MARZO 2008

INVESTIGACION
Y CIENCIA

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



SALUD PUBLICA
Fluoración del agua potable

MEDICINA
Terapia vascular contra el cáncer

GEOLOGIA
Dinámica de los puntos calientes

COSMOLOGIA
Estrellas masivas y efímeras

www.investigacionyciencia.es

6,00 EUROS

ELECTRICIDAD SOLAR

¿Podría liberarnos de la dependencia de los combustibles fósiles?

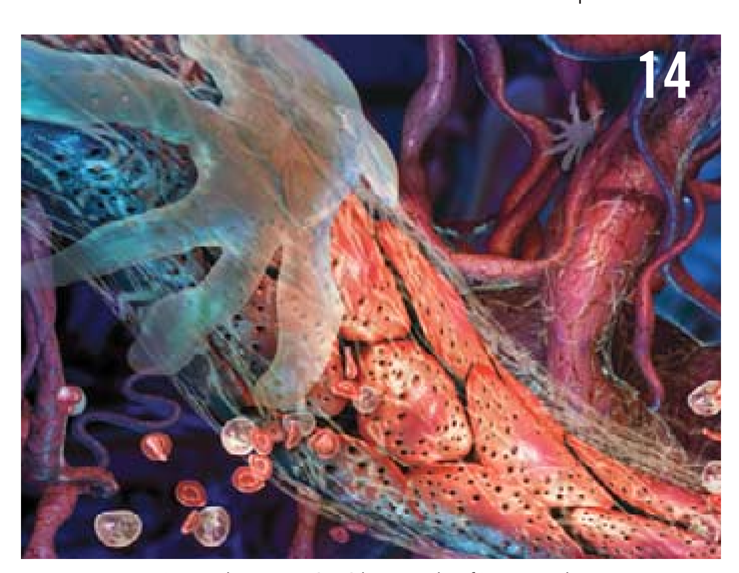
00378
9 770210 136004

SUMARIO

Marzo de 2008/ Número 378



Las larvas de equinodermos presentan una simetría distinta de la que define a los adultos.

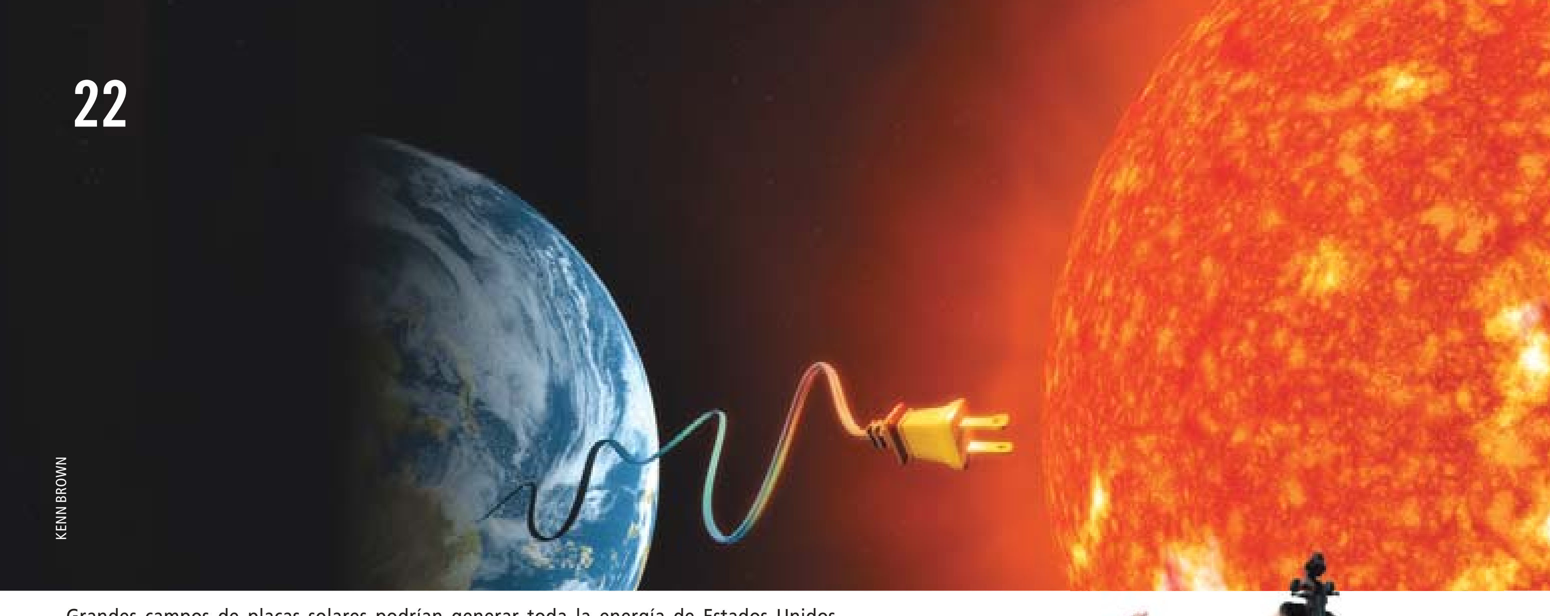


Los vasos sanguíneos aberrantes impiden que los fármacos alcancen las células cancerosas.



Ingerimos flúor a través de alimentos, bebidas y dentífricos. ¿Corremos el riesgo de una sobredosis?

ARTICULOS



Grandes campos de placas solares podrían generar toda la energía de Estados Unidos.



La vida violenta de las mayores estrellas.



Puntos de referencia geológicos que no son fijos, como se creía.



Un tejido complejo confiere a las cuerdas vocales unas propiedades acústicas excepcionales.

SECCIONES



DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
Laia Torres Casas
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S.A. Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Telefax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
CHIEF NEWS EDITOR Philip M. Yam
SENIOR WRITER Gary Stix
SENIOR EDITOR Michelle Press
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Mark Fischetti, Steve Mirsky, George Musser y Christine Soares
CONTRIBUTING EDITORS W. Wayt Gibbs, Marguerite Holloway, Michael Shermer, Sarah Simpson
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

CHAIRMAN Brian Napack
PRESIDENT Steven Yee
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Dean Sanderson
VICE PRESIDENT Frances Newburg
GENERAL MANAGER Michael Florek

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca
Trigo, 39, Edif. 2
28914 Leganés (Madrid)
Teléfono 914 819 800

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

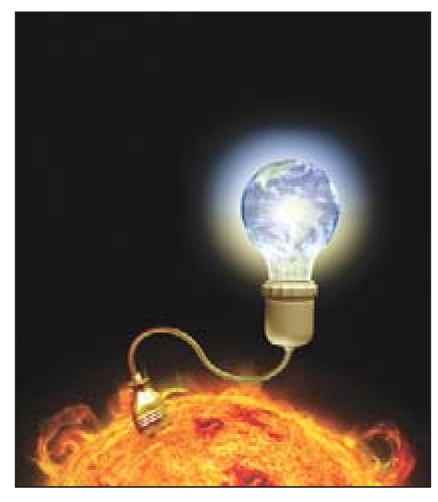
Madrid:
MMCATALAN PUBLICIDAD
M. Mercedes Catalán Rojas
Recoletos, 11 3.º D
28001 Madrid
Tel. y fax 915 759 278
Móvil 649 933 834

Cataluña:
QUERALTO COMUNICACION
Julián Queraltó
Sant Antoni M.ª Claret, 281 4.º 3.ª
08041 Barcelona
Tel. y fax 933 524 532
Móvil 629 555 703

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Juan Manuel González Mañas: *Terapia vascular para tratar el cáncer*, *El origen de las larvas*; Luis Bou: *Fluoración, de nuevo a examen*, *El instrumento musical humano*, *Puesta al día* y *Apuntes*; Sònia Ambròs i Albesa: *Puntos calientes en movimiento*; J. Vilardell: *Hace...* e *Ideas aplicadas*; Bruno Moreno: *Apuntes* y *Ciencia y sociedad*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Marián Beltran: *Desarrollo sostenible*



Portada: Jean-Francois Podevin

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	65,00 euro	120,00 euro
Resto del mundo	100,00 euro	190,00 euro

Ejemplares sueltos:

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Sr. Director,

El apasionante número con que su revista abre el año 2008 provocaría sin duda cerradas andanadas epistolares si *Investigación y Ciencia* contase con una sección de Cartas a la Redacción. Al hilo del debate entre evolucionismo y religión, consienta usted que apunte algunas consideraciones, seguramente inoportunas.

La posición neodarwinista, vigorosamente defendida por Dawkins et al., se presta a la acusación, ya no de dogmática, sino de fundamentalista. *Origin of Species* puede ser cimiento para *una* cosmogonía; el problema nace del empeño en que sea *la* cosmogonía: en ese punto van parejos con el creacionismo literal, el ultracreacionismo. Se ha culpado al neodarwinismo de ameboide: como hicieron el marxismo, el psicoanálisis y la teología cristiana, emite, a modo de pseudópodos, hipótesis *ad hoc* para engullir aquellos "hechos" que las contradigan.

El dogmatismo evolucionista que se imparte en las escuelas, en los textos y en programas de entretenimiento divulgativo de los medios de comunicación, casi siempre elude o rehuye la prueba de sus afirmaciones, o mezcla elementos observados con especulaciones osadas, a menudo de carácter teleológico (los xxx evolucionaron *para* yyy) que el propio evolucionismo repudiaría. De la mano de los datos reales, tales afirmaciones adquieren el rango de *hechos*, que es necesario aceptar y repetir so pena de mofa o desdén en tu grupo profesional (o profesoral), o más modestamente, del suspenso. El "Mostrad cómo" del catecismo respetaba la exigencia de la demostración. La más fundada crítica al neodarwinismo reside precisamente ahí: No nos digáis "Así tuvo que ser" ¡Mostradnos cómo!

Permítame, Sr. Director, apuntar un par de ideas, aunque sea a beneficio de inventario. Si en alguna ciencia se han mostrado altivos los humanos, ha sido ésta la matemática. Kant no anduvo lejos de afirmar que la geometría [euclídea] le estaba impuesta a la misma Divinidad; un siglo después, algo tan "obvio" como el postulado de las paralelas mordía el polvo. En cuanto el lenguaje fue lo suficientemente perfecto, quedó enunciado con nitidez el principio de causalidad. Todas las demostraciones siguen siendo cadenas finitas de concatenaciones causales. No pocas se han basado en postulados "evidentes": el de las paralelas, por ejemplo. La reparación de los destrozos parecía posible con la teoría de conjuntos. La paradoja de Russell, el axioma de elección, la hipótesis de continuo, el teorema de incompletitud, la paradoja de Banach-Tarski y tantas otras dificultades han convertido a los fundamentos, ¡a los fundamentos!, de la matemática en un cenagal. Y si se afirma, como ahora es frecuente, que el principio de causalidad es consecuencia de la estructura del lenguaje, que, en definitiva, lo es de la comprensión del mundo que nuestro sistema nervioso autoriza, fruto de procesos evolutivos, ¿no se incurre en una petición de principio?

Se podría decir que la ciencia consiste en la destrucción de lo evidente. *Evidentemente* el movimiento (y no sólo de objetos materiales) se debe a una causa. Por la causalidad se llega hasta Dios, pensaba el Doctor Angélico. ¿Más *evidencias*? ¿Qué han hecho el principio de inercia, el de relatividad, el de indeterminación, la concepción acausal, probabilística, de la mecánica cuántica, sino derrocarlas?

Tal vez la ciencia de los poderosos debiera de hacer ejercicio de modestia, sin abandonar por eso su ambición. "Seréis como dioses" se nos tienta en el Génesis: conoced, comprended, estableced las oportunas relaciones causales y seréis *como* dioses. Pero no todopoderosos. Parece claro: existen problemas "intrínsecamente difíciles", no todos los problemas son resolubles, y me atrevería a decir que los resolubles constituyen un conjunto de medida 0. Lo sabía Agustín, el que quiso guardar el mar en un hoyo. Y lo debería saber quien ambicione conocimiento: sus métodos, sus razonamientos, su instrumental, son redes con las que barre el mar. De él sacará algas o desechos, y con suerte, algo de pesca. Y su red, mojada, algo de agua, que vuelve al océano, pues de cada respuesta nacen mil preguntas.

No seguiré abusando de su paciencia, querido director. Y ni piense que me baño en agua bendita: la inteligencia y la sabiduría no sólo habitan en el materialismo; sigo prefiriendo a Epicuro. Quién sabe si en el fondo de la indagación de causas, orígenes, evoluciones y creaciones, no late sino la (des)esperanza de un Más Allá. De que tendremos fin, ¡ay!, no cabe la duda. Pero como todo lo evidente...

—*Luis Bou*
La Coruña

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

...cincuenta años

Energía, cenizas y dinero. «Si va a producirse energía atómica a una escala importante, habrá que dar con procedimientos para deshacerse sin peligros de las enormes cantidades de ‘cenizas’ radiactivas que se generarán en los reactores nucleares. El mes pasado un comité de la Academia Nacional de Ciencias informó acerca de la eliminación de residuos, señalando que los costos del almacenaje temporal de productos radiactivos de fisión hasta que se ‘enfríen’, de la extracción de isótopos de vida larga y del transporte de los residuos para su eliminación definitiva en lugares remotos influirán de forma notable en la economía de la energía nuclear.»

El criptón y el matrimonio. «La preciosa barra de platino iridiado que se guarda en Sèvres (Francia) y contra la que están teóricamente contrastadas todas las escalas de longitud del mundo puede que no tarde en ser fundida y convertida en anillos de boda. Un comité asesor internacional para la definición del metro ha recomendado la adopción de un patrón de longitud atómico: una línea espectral naranja del criptón 86. El metro se definirá entonces como 1.650.763,73 veces esa longitud de onda. Esa línea del criptón es la más nítida y definida de las actualmente disponibles para mediciones de longitud.»

...cien años

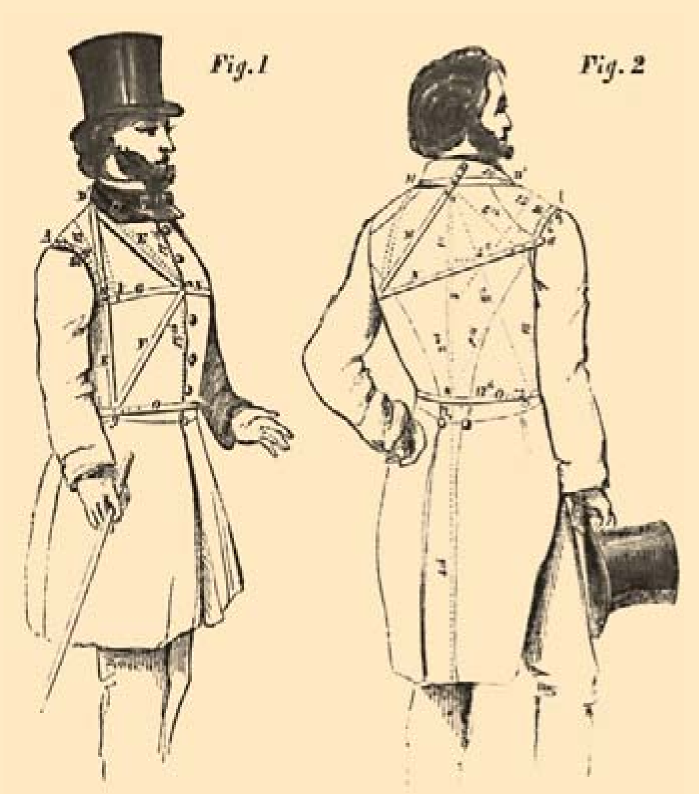
Ala roja. «La Asociación de Experiencias Aéreas, formada el verano pasado por el doctor Alexander Graham Bell, se ha dedicado activamente durante los tres últimos meses a la construcción y ensayo de un aeroplano. En su prueba inicial, el aparato [el “Ala Roja”] fue pilotado por el señor F. W. Baldwin. Se empleó un motor Curtiss de 8 cilindros con una potencia de 40 caballos. La idea de instalar al aeroplano patines y ensayarlo sobre hielo parece ser excelente. Debido al calor y al derretimiento del hielo del lago Keuka, junto a Hammondsport (Nueva York), donde tuvo lugar el experimento, se temía que no fuera posible ensayar la máquina. Pero, por suerte, una ola de frío brindó a los experimentadores la oportunidad de ejecutar la prueba: el 12 de marzo, en su primer intento, el aeroplano voló una distancia de 97 metros y 20 centímetros.»

Renovación. «En los viejos días del 49 los barcos que hacían escala en Yerba Buena —así se llamaba entonces San Francisco— se veían varados y abandonados a su suerte, pues las tripulaciones desertaban en masa en pos del oro. Entre aquellos barcos estaba el ‘Niantic’, construido en un astillero de Maine. Tras ser abandonado, fue arrastrado a tierra, al cruce de Clay y Sansome, y convertido en casa de huéspedes. El agua poco profunda de la popa se llenó gradualmente de arena. Sobre sus cuadernas se erigió el Bloque de Apartamentos Niantic, pero pereció en el gran incendio de abril de 1906. En fecha reciente, al excavar para cimentar un nuevo edificio Niantic, se hallaron la quilla y las costillas del viejo buque, atrapados en la arena y el barro.»

La cuarta dimensión. «La matemática es la más exacta y sólidamente fundamentada de las ciencias. Y, sin embargo, en el mismo terreno que explora su riguroso y tedioso método han surgido, de la mano de la imaginación, estructuras maravillosas, como de cuento fantástico, que rebasan todas nuestras experiencias. Han llegado al concepto de cuarta dimensión y de dimensiones de mayor orden. Sería imposible confinar a quien poseyera el secreto de esa dimensión entre las seis superficies de una celda en la cárcel. El más leve de sus movimientos en la dirección de una cuarta dimensión lo colocaría en el acto fuera del espacio tridimensional. Y mientras se hallase en el espacio tetradimensional bien haría en cuidar lo que hace, pues al regresar al espacio tridimensional podría haber sufrido grandes cambios.»

...ciento cincuenta años

El hombre es la medida. «Al recordar que la figura humana es la cima de la gracia y la simetría, resulta algo desconcertante ver a tantas personas desmañadas y sin gracia recorriendo nuestras calles, por lo que nos vemos abocados a la conclusión de que su sastre no les hizo justicia al cortarles la ropa. Tan culpable es la indiferencia hacia el propio aspecto; y puesto que hemos de vestir prendas para abrigarnos, correcto y justo es que nos sienten bien. Mostramos aquí un instrumento patentado por Simeon Corley, de Lexington (Carolina del Sur), destinado a tomar medidas exactas del cuerpo y dibujar luego sobre tela el indumento.»



Confección a medida y científicamente exacta, 1858

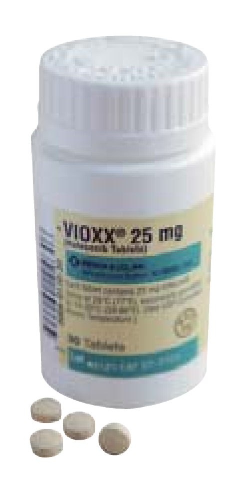
SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XIII, Nº. 29; 28 DE MARZO DE 1958

¿Qué ha sido de ...?

Recopilación de Philip Yam

Los pagos del Vioxx

Merck parece haber cerrado el capítulo sobre el Vioxx. El gigante farmacéutico ha accedido a pagar 4850 millones de dólares (unos 3300 millones de euros) a los demandantes. Se había demostrado en ensayos clínicos que este analgésico elevaba el riesgo de accidentes vasculares en el corazón y en el cerebro. Pero Merck ha ganado la mayoría de los pleitos que han llegado a los tribunales, pues los abogados de los querellantes tuvieron grandes dificultades en vincular problemas concretos con el fármaco. El costo del acuerdo, que supone algo menos del beneficio esperado por Merck en el ejercicio de 2007, es muy inferior a los 25.000 millones de dólares de indemnizaciones previstos por ciertos analistas.



¿Enfermedad priónica... sin priones?

Unas proteínas anómalas, denominadas priones, desempeñan un papel crucial en el desarrollo de enfermedades cerebrales que afectan al ganado vacuno, a los cérvidos y a los humanos, entre otros mamíferos. Las pruebas de detección de estas enfermedades se basan en la búsqueda de una forma de prion resistente a enzimas [*véase* "Detección de la enfermedad de las vacas locas"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 2004]. Pero la búsqueda de esa versión puede pasar por alto ciertos casos. En un estudio publicado en la edición electrónica de *Journal of Biological Chemistry*, se informaba de que en ratones que fallecían a causa de una infección del "mal de las vacas locas" no aparecían indicios de los priones mal formados, resistentes a las enzimas. Los resultados del estudio apuntan a que otros estados del prion pueden ser causa de infección, o bien, a que los priones pueden ser un subproducto de una infección desencadenada por algún otro patógeno, no conocido todavía.

Nada de nuevo

El físico Sydney Drell y los exsecretarios de estado Henry Kissinger y George P. Shultz han respaldado todos ellos "un mundo sin armas nucleares" e instado a los gobiernos a que adopten "enérgicamente las medidas precisas a tal fin" [*véase* "Nuevas ojivas nucleares"; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, enero de 2008]. Ello no obstante, en una reciente carta dirigida a los senadores de Estados Unidos escribían que el desarrollo de la RRW (*Reliable Replacement Warhead*, es decir, ojiva fiable sustitutiva), "debería sin duda seguir adelante".

¿Se contradicen ambas tesis? "Nunca he dicho que hubiera que cercenar la RRW", afirma Drell. Durante el proceso de transformar el mundo para que sea lo que deseamos, "tenemos que mantener la reserva (de cabezas nucleares) a salvo y fiable". En tal reserva se cuentan las ojivas atómicas del misil MX (*ilustración*).

El respaldo de Drell se funda en varias consideraciones: que RRW no constituye un arma para nuevas aplicaciones, que no detrae fondos destinados al almacenamiento seguro de las armas existentes, y que no infringiría los tratados de no proliferación. Aunque los expertos se preguntan si se puede certificar la fiabilidad de la RRW sin realizar ensayos, Drell insiste en que "es absolutamente esencial que no se efectúen nuevas pruebas", a fin de que no se ponga en duda la sinceridad de EE.UU. en lo concerniente a la prohibición de ensayos y a la no proliferación.

—David Biello

Sin Sol

Una ciudad a la que no llegue la luz del Sol parecerá salida de una película de terror. Pues así le sucede en invierno a Rattenberg, una villa austriaca encajada entre montañas. Hace dos años, sus residentes confiaban en que para estas fechas estuvieran instalados 15 grandes espejos, o heliostatos, que reflejarían los rayos solares sobre sus calles. Sin embargo, dificultades presupuestarias han ensombrecido las esperanzas en Rattenberg. La ciudad había contratado al Laboratorio Bartenbach —un innovador en proyectos de iluminación— y a Bomin Solar; la Unión Europea aflojó los cordones de la bolsa. Pero otras fuentes de financiación se echaron atrás, y Bomin se despidió del proyecto. Wilfred Pohl, director de investigación de Bartenbach, explica que su laboratorio se había reunido recientemente con funcionarios municipales para encontrar apoyos financieros. Lo más probable es que los residentes de Rattenberg sigan sin ver el Sol de invierno.

—Michael Dumiak



DAVID KADLUBOWSKI *Corbis* (*Vioxx*); NUKEPHOTO.COM/PAUL SHAMBROOM/AURORA PHOTOS (*ojivas*); ROBERT PARIGGER AP PHOTO (*Rattenberg*)

ORNITOLOGIA

¿Por qué las aves migratorias vuelan en V?

Existen dos explicaciones complementarias, ambas con sólido respaldo, de que las aves vuelen en formación. En las aves migratorias son típicas y fácilmente reconocibles lo mismo las formaciones en V que en J; se ha demostrado que la segunda es más frecuente que la ordenación en V. De acuerdo con una de las explicaciones del fenómeno propuestas, las aves postreras se benefician del torbellino ascendente que levantan las aves de cabeza. A tenor de otra interpretación, la formación organizada de vuelo facilita una separación adecuada dentro de la bandada, la orientación y la comunicación interna en el grupo.

Es indudable que la importancia relativa de una u otra ventaja va cambiando con la modificación de diferentes factores, como la estación del año o la finalidad de cada vuelo en particular. Así, cuando se trata de vuelos de corto alcance en busca de alimento, el ahorro de energía debe de importar menos que una cuidadosa orientación y la evitación de colisiones. Durante las migraciones a grandes distancias, por otra parte, cada miembro del grupo logra una gran ventaja si optimiza su posición para ahorrar energía.

—Bruce Batt



BIOLOGIA

Dulces huesos

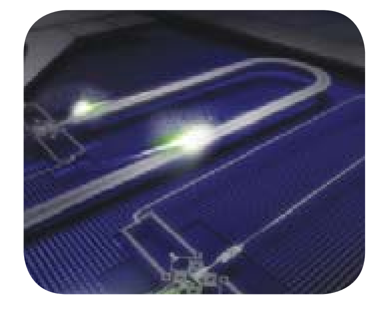
Aunque los dulces pueden contribuir al debilitamiento de los dientes, parece que los azúcares son esenciales para fortalecer los huesos. La extraordinaria resistencia de los huesos depende de la forma compleja y precisa en la que se ordenan sus componentes orgánicos e inorgánicos. Se venía pensando que el colágeno y otras proteínas controlaban directamente la estructura ósea. Se sospecha ahora que los compuestos azucarados son los verdaderos responsables, en particular los glicosaminoglicanos y proteoglicanos. Basándose en imágenes obtenidas mediante resonancia magnética nuclear de huesos de caballo, se ha llegado a la conclusión de que esos polisacáridos contribuyen a llevar a buen puerto una cristalización adecuada de los minerales de los huesos. Una mejor comprensión del proceso de formación de los huesos debería modificar el tratamiento de la osteoporosis y la osteoartritis y, quizá, conducir al descubrimiento de nuevos métodos de creación de huesos sintéticos.

—Charles Q. Choi

COMPUTACION CUANTICA

Un bus para qubits

Dos equipos han construido el primer bus de datos cuánticos. Un bus es un medio de transferir datos entre diferentes componentes de un sistema informático. En este caso, transfiere la información contendida en un qubit —el elemento básico de la información cuántica, como un bit lo es de la información clásica— a otro qubit. Este primer bus cuántico consiste en un hilo retorcido, intercalado entre dos bucles superconductores, que servían de qubits. Una vez activado, un bucle qubit transfiere su estado cuántico de superposición al hilo por medio de un fotón de microondas.



Se ha construido un bus de datos cuánticos (el hilo curvo, en esta representación).

El director de uno de los equipos, Raymond Simmonds, del Instituto Nacional de Pesos y Medidas en Boulder, logró que un hilo de siete milímetros de largo almacenase un fotón durante más de un microsegundo. Por su parte, Rob Schoelkopf, de la Universidad de Yale, y su grupo han realizado algo similar con un hilo más largo, que mezcló un único estado cuántico entre dos qubits. Para lograr una computadora cuántica, empero, sería necesario mantener los qubits superconductores estables —"coherentes"— durante períodos más largos.

—J. R. Minkel

DLILLC/CORBIS (*gansos*); ILUSTRACION DE MICHAEL KEMPER, CORTESIA DE NIST (*bus cuántico*)

PESTICIDAS

Insectos que vencen al Bt

Los investigadores llevan mucho tiempo preocupados por la posibilidad de que los insectos que devoran las cosechas puedan adquirir resistencia al Bt, una toxina inofensiva para la mayoría de los demás organismos. La produce *Bacillus thuringiensis*. El uso del Bt es muy común; se utiliza en más de 32 millones de hectáreas de cultivos en todo el mundo, una superficie algo mayor que Italia. Mario Soberón, de la Universidad Autónoma Nacional de México, y sus colaboradores investigaron las toxinas Bt usadas más frecuentemente. Esas sustancias actúan enlazándose a receptores específicos en el tracto intestinal de los insectos. Los investigadores encontraron tres especies de insectos que habían evolucionado para desarrollar receptores de la toxina modificados que, parece, confieren resistencia al Bt. Sin embargo, también hay buenas noticias. En la UNAM crearon, además, toxinas modificadas que pueden acabar con las orugas rosadas, o lagartas rosadas, del algodón, que se han hecho resistentes al Bt. Estas nuevas toxinas son un poco menos potentes que las versiones originales contra los insectos vulnerables, pero nuevas investigaciones podrían mejorarlas.

Una oruga mastica la flor de la planta del algodón.

—Charles Q. Choi

PALEONTOLOGIA

Alimentos y pensamiento simbólico

Hay una cueva en la costa meridional de Sudáfrica que abunda en restos de moluscos de hace unos 165.000 años. Aparte de adelantar la fecha de la primera mariscada conocida en unos 40.000 años, este descubrimiento indica también la fecha más temprana conocida en la que el ser humano podría haber dejado constancia constancia de pensamiento simbólico.

Lajas ricas en hierro de hace 165.000 años muestran surcos: parece que una población de comedores de marisco las rayaban para obtener un pigmento rojo.

Los humanos modernos, anatómicamente hablando, debieron de surgir hace entre 150.000 y 200.000 años en Africa Oriental. Sigue sin saberse el momento en que adquirieron la capacidad de pensamiento simbólico. En busca de restos humanos primitivos el grupo dirigido por Curtis W. Marean, del Instituto de Orígenes Humanos de la Universidad estatal de Arizona, acudieron a las cuevas de Pinnacle Point, en Sudáfrica. Además de descubrir los restos de mejillones pardos y otros moluscos, encontraron pequeños cuchillos de piedra y rocas rojizas entre las conchas. Identificaron alrededor de una docena de piedras de hematita, rica en hierro, cuyas caras planas presentaban surcos paralelos, señal de que los individuos que comieron los mejillones rascaban las rocas para obtener polvo. La mezcla de este polvo con savia o con otro aglutinante da lugar a una pintura rojiza o rosada, probablemente para adornar el cuerpo o la cara.

Que se utilizasen pigmentos en aquella época "es un indicio bastante sólido de pensamiento simbólico", afirma Marean. Una población que se alimentase de marisco habría permanecido en el mismo lugar y aumentado en número, indica Marean, incrementándose así la necesidad de negociaciones entre individuos o grupos sociales, lo cual podría haber llevado a un sistema de marcas decorativas.

—J. R. Minkel

DATOS



Desarmados frente al SARM

Las nuevas estimaciones de las infecciones provocadas por *Staphylococcus aureus*, bacteria resistente a la meticilina (SARM), han asombrado a los expertos, que no habían considerado que esta bacteria fuese un problema sanitario grave. Se ha efectuado un estudio prospectivo de la población en nueve lugares distintos y se han extrapolado los datos de 2005 a la totalidad de los Estados Unidos. Algunos casos recientes de SARM invasivo en los que murieron niños han provocado una cierta preocupación. Sin embargo, en su mayoría los fallecimientos correspondieron a personas de más de 65 años y las infecciones solían producirse en hospitales y no en colegios ni parques infantiles.

Número de casos de SARM en la prospección (2005):	**8987**
Número de muertes en hospital en la prospección:	**1598**
Número estimado de casos en los Estados Unidos:	**94.360**
Número estimado de fallecimientos:	**18.650**
Número de muertes por sida en Estados Unidos en 2005:	**17.011**
Infecciones por SARM en Estados Unidos por cada 100.000 personas:	**31,8**
En personas con 65 años o más de edad:	**127,7**
En personas con 5-17 años de edad:	**1,4**

FUENTES: Journal of the American Medical Association, *17 de octubre de 2007; Centros para la Prevención y el Control de las Enfermedades*

NIGEL CATTLIN *Holt Studios International/Photo Researchers, Inc. (oruga)*; CORTESIA DEL PROYECTO ARQUEOLOGICO MOSSEL BAY *(laja)*; MATT COLLINS *(dibujo)*

AGRICULTURA

Signos de una revolución verde

La producción de alimentos per capita en el Africa subsahariana comienza a aumentar. Según el Informe sobre el Desarrollo Global de 2008, del Banco Mundial, el crecimiento agrícola en esa zona "se ha acelerado desde un 2,3 por ciento anual en el decenio de los ochenta a 3,3 por ciento en el de los noventa y a 3,8 por ciento anual entre los años 2000 y 2005". Ese crecimiento ha reducido las cifras de pobreza en 10 de los 13 países analizados. Además de la ausencia de sequías, estos resultados fueron consecuencia de la "revolución verde" africana, que los expertos y los funcionarios de las Naciones Unidas preconizaron en el año 2004. Supone estrategias poco complicadas, entre ellas las subvenciones gubernamentales para abonos y semillas mejoradas, de manera que los agricultores sólo paguen un 25 por ciento del coste real. La producción de alimentos ha ido aumentando por encima del crecimiento de la población. Sin embargo, siguen existiendo problemas, como el difícil acceso a los mercados agrícolas del mundo desarrollado. Y la presión mundial para producir biocombustibles en lugar de comida podría significar que el hambre no se erradicará por el momento.

—*David Biello*



Un éxito creciente: medidas sencillas, como el riego con bombas.

NEUROLOGIA

¿Trastornos psiquiátricos por falta de sueño?

Los problemas psiquiátricos pueden desencadenar problemas del sueño y la falta de sueño puede provocar perturbaciones psicológicas. Matthew Walker, de la Universidad de California en Berkeley, y sus colaboradores estudiaron a 26 voluntarios, 14 de los cuales se mantuvieron 35 horas sin dormir. Posteriormente, todos los voluntarios miraron unas fotografías que iban desde lo apacible (cestas de mimbre) hasta lo cada vez más turbador (tarántulas y víctimas de quemaduras). Los escáneres cerebrales realizados revelaron que, cuando los pacientes privados del sueño veían las imágenes más terribles, su amígdala mostraba un 60 por ciento más de actividad en comparación con la respuesta de la población normal. Esta actividad excepcional provoca un rápido péndulo de emociones, desde el enfado y el disgusto hasta un cierto aturdimiento. Entre sus muchas otras funciones, el sueño puede servir para preparar "nuestro cerebro emocional para las interacciones sociales y emocionales del día siguiente", afirma Walker.

—*Nikhil Swaminathan*



PSICOLOGIA

Mejor reír que bailar

Para que pueda tenerse a un robot como a un ser humano más, quizá se requiera sólo un poco de roce. Se llevó a un jardín de infancia un robot humanoide de algo más de medio metro de alto, QRIO, que ríe cuando se le toca la cabeza. Con el tiempo, los niños, que carecen de nociones preconcebidas sobre los androides, le tomaron cariño; lo tocaban como a los demás. A los cinco meses, lo trataban casi como a un igual; hasta le cubrían con una manta y le decían "buenas noches" cuando se quedaba sin pilas. Pero cuando se le reprogramó para que bailase, perdieron el interés.

—*Charles Q. Choi*

Esculturas disipativas

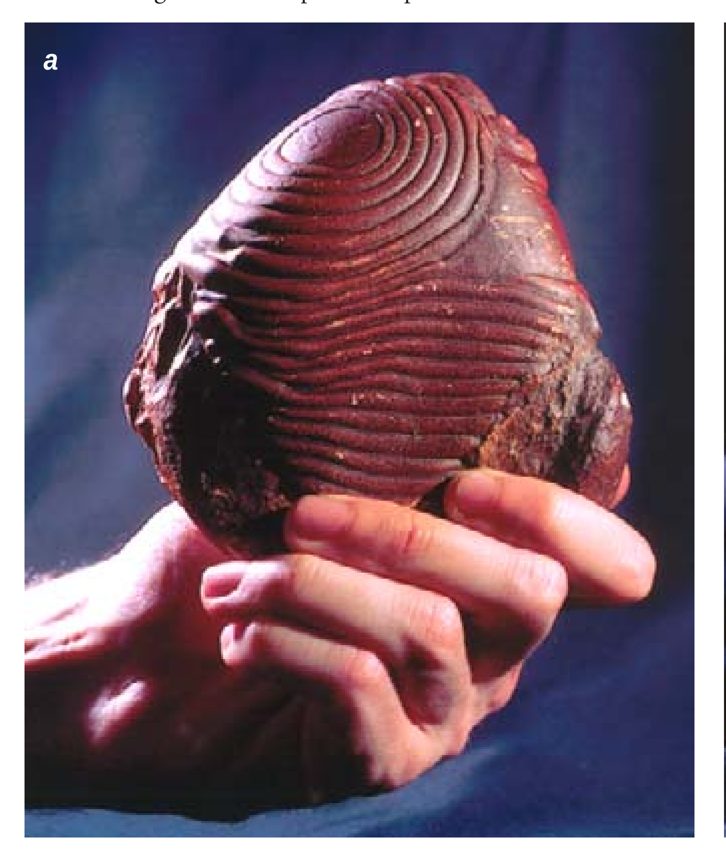
Círculos y espirales en rocas del desierto

En sus aventuradas excursiones por el desierto al este de Egipto, entre los paralelos 26 y 28 y los meridianos 33 y 34, con riesgo de muerte en una ocasión, dos de los autores, Hartmut y Gudrun Linde, descubrieron unas curiosas piedras de sílex en varios de sus viajes desde 1996. Estaban empotradas en una zona sedimentaria caliza perteneciente a una formación con conchas de numulites, fósiles de protozoo del Eoceno Inferior (hace más de treinta millones de años). Tenían inscritos relieves de formas bien definidas.

Buscando en libros y revistas y husmeando en museos y exposiciones, sólo hemos encontrado una descripción indirecta que pueda referirse a ellas, por lo que nos atrevemos a afirmar que estamos ante una forma rocosa natural nueva, no registrada antes en la bibliografía científica. Figuras en roca parecidas pro-



1. Relieves sobre nódulos, cuya escala ilustran las gafas.





K. SEYFERT, BERLIN (*arriba*); J. RODRIGUEZ (*abajo*)

2. Anverso (*a*) y reverso (*b*) de un nódulo: el anverso presenta círculos concéntricos (la mano da idea de la escala del relieve); el reverso, una espiral dextrógira. La piedra tiene el 85 % de su superficie cubierta por un relieve o escultura bastante compleja, compuesto de partes espirales, regulares e irregulares, o elípticas, con numerosas disclinaciones, consecuencia de varias secuencias de crecimiento-paro, alternadas e irregulares.



3. Variedad de nódulos con una diversidad de relieves de escala centimétrica.



4. Nódulos con pocos relieves, que muestran más de una etapa de crecimiento.



5. Entre los nódulos, uno seccionado para ilustrar un crecimiento concéntrico en dos etapas.

vienen de fósiles (Helminthoides y Nereites), pero al seccionar muchas de las piedras se vio que no era este el caso.

Estas piedras o nódulos fueron esféricos en un principio. En etapas posteriores de su crecimiento —un crecimiento de material amorfo compuesto de minúsculos cristalitos—, se generaron concreciones de forma más o menos regular, con relieves superficiales que en ocasiones eran concéntricos y en ocasiones fragmentos de varias espirales empalmadas, Es una conformación propia de un crecimiento sacádico (con cambios rápidos), que da también lugar a "defectos" de orientación, o "disclinaciones".

Por su morfología (*figuras 3 a 5*) se supone que se produjo un crecimiento secuencial, en multicapas. Los relieves "esculpidos" provendrían de etapas de crecimiento alternadas con procesos de difusión y acumulación de ácido silícico, $Si(OH)_4$, y parones súbitos. El crecimiento debió de empezar con un nódulo germinal gelatinoso, medio líquido, medio sólido, como el hormigón o la pasta de dientes, una de esas sustancias a las que se denomina materiales, o medios, de Bingham. Los materiales de este tipo fluyen cuando se sobrepasa cierta compresión (o "cizalla umbral de fluidez"), y lo hacen entonces como un líquido ordinario, como el agua. Por su gelatinosidad, resulta fácil deformarlos;



antes de fluir se comportan como sólidos elásticos.

El nódulo, al crecer, tiene a expandirse por su entorno, donde está la fuente de $Si(OH)_4$. Pero este proceso expansivo y de crecimiento pronto se para porque el proceso de difusión es más lento que el de crecimiento y no da abasto. Aparece una de las etapas de crecimiento-parada y subsiguiente solidificación. Pero el fluir no se detiene y en otros puntos, además, comienza de nuevo el anterior proceso de crecimiento y expansión, que pronto vuelve a pararse, y así sucesivamente. Cabe admitir la intervención de otros mecanismos de crecimiento-expansión-parada, pero resultaría demasiado prolijo abordar aquí la cuestión.

Al final, el proceso de crecimiento de un nódulo macroscópicamente amorfo deja como huella o firma unos relieves externos, reflejo de un sistema en flujo y fuera de equilibrio donde, aparte de las cizallas, corrientes fluidas y deformaciones elásticas prefluidas, actúa la difusión, que empieza originando la acumulación de material y que luego frena el crecimiento, por su lentitud con respecto a éste. De ahí la denominación de la firma que deja el proceso de crecimiento: "escultura disipativa" o "relieve disipativo".

Por último, fijémonos en la figura 4. Entre las piedras distinguimos un nódulo esférico y dos nódulos esféricos empalmados, al parecer formados en dos etapas. En las secciones de uno de los nódulos, cortadas en el laboratorio para ver el interior, se perciben fácilmente dos capas superpuestas, como cabe comprobar en la figura 5. Podemos, pues, excluir su origen fósil (animal o vegetal). Lo corroboran los muchos nódulos, de los casi doscientos recogidos, que se han seccionado. También se encontraron nódulos o concreciones con varias capas internas y con formas no sólo esféricas, sino ovaladas.

Hartmut Linde,
Gudrun Linde
y Manuel García Velarde
Instituto Pluridisciplinar,
Universidad Complutense de Madrid

Astronomía

Descubierta hace poco, presenta características difíciles de explicar

Nuestra galaxia está repleta de los restos de estrellas muertas. Cuando terminan su vida, las estrellas de la Vía Láctea, en su mayoría, se desprenden de sus capas externas y encogen hasta convertirse en enanas blancas, esferas muy densas con un tamaño similar al de la Tierra. Sin embargo, las estrellas con una masa muy grande explotan constituidas en supernovas y dejan tras de sí restos más densos, las estrellas de neutrones, que, con un diámetro de tan sólo 20 a 40 kilómetros, pesan más que el Sol. (Las estrellas de mayor masa se convierten en agujeros negros.)

Desde los años sesenta, los astrónomos han venido observando diversidad de estrellas de neutrones; por ejemplo, púlsares que giran a una velocidad celerísima y emiten ondas de radio por toda la galaxia, o estrellas binarias de rayos X que devoran la materia que arrancan a sus estrellas compañeras. Un grupo de investigadores nos habla de la que quizá sea la estrella de neutrones más extraña encontrada hasta ahora, una estrella solitaria emisora de rayos X en la constelación de la Osa Menor, que no parece corresponder a ninguna de las categorías observadas hasta hoy.

Las estrellas de neutrones presentan unas características físicas fascinantes. Su aplastante gravedad hace que los electrones y protones se fusionen y engendren neutrones. En el núcleo del astro, los neutrones pueden fragmentarse en sus quarks constitutivos. Para comprender mejor la formación y la evolución de estos cuerpos, algunos se han centrado en las estrellas de neutrones solitarias, alejadas de los residuos nebulosos de las supernovas que las crearon.



CASEY REED, CORTESIA DE LA UNIVERSIDAD ESTATAL DE PENSILVANIA

Esta representación de una estrella de neutrones solitaria muestra las líneas del campo magnético que rodean a ese densísimo residuo estelar.

A lo largo de los diez últimos años, el telescopio espacial alemán ROSAT ha detectado siete objetos de ese tipo que emitían rayos X, sin producir ondas de radio, como las generadas por los púlsares, alimentados por la rotación. Esas estrellas de neutrones, apodadas las "Siete Magníficas", en referencia a la película clásica de los años sesenta, se encuentran cerca (la mayoría están a menos de 2000 años luz de distancia del Sol) y son jóvenes (tienen probablemente menos de un millón de años).

En busca de más estrellas de neutrones solitarias, un equipo integrado por Robert Rutledge, de la Universidad McGill, y Derek Fox y Andrew Shevchuck, de la Universidad estatal de Pennsylvania, identificaron una nueva fuente ROSAT de rayos X en una zona del firmamento donde no había estrellas ordinarias. Observaciones más detalladas con telescopios terrestres y espaciales revelaron un objeto cuyo espectro era similar, a gran-

des rasgos, a los de las Siete Magníficas. Sin embargo, este nuevo objeto difería lo suficiente de las demás estrellas de neutrones solitarias como para que se le pusiera el nombre de Calvera, el enemigo de los siete pistoleros de la película. Calvera se encuentra en una latitud galáctica inusualmente alta; desde la perspectiva de la Tierra, la estrella de neutrones está situada unos 30 grados sobre el disco de la Vía Láctea. Si Calvera tiene las mismas características que las demás estrellas de neutrones solitarias, habrá de encontrarse a 25.000 años luz de la Tierra y 15.000 años luz por encima del plano galáctico.

Esa situación de Calvera caería en el halo galáctico, la difusa región esférica que rodea la Vía Láctea. Ante la improbabilidad de la formación de una estrella de neutrones en el halo, los investigadores conjeturaron que Calvera podría haber sido arrojada fuera del disco galáctico por la fuerza de su violento nacimiento. Sin embargo, si Calvera se consitituyó hace menos de un millón de años, como predicen los modelos, tendría que haber escapado de la Vía Láctea a la tremenda velocidad de más de 5000 kilómetros por segundo, mucho mayor que la de ninguna otra estrella de neutrones.

Un misterio que puso en tela de juicio la idoneidad de la clasificación de Calvera dentro de la categoría de las estrellas de neutrones solitarias. Tal vez se trate de un púlsar de milisegundos, una estrella de neutrones de rotación acelerada por la acreción de materiales de su estrella compañera (que, en el caso de Calvera, habría sido totalmente devorada o se habría dispersado hace mucho). Si esta hipótesis fuese correcta, Calvera estaría mucho más cerca de la Tierra: entre 250 y 1000 años luz. En tal caso, sería una de las estrellas de neutrones más cercanas.

Ahora bien, cuando se apuntó un radiotelescopio hacia Calvera, no se detectaron los pulsos ultrarrápidos que debería emitir un púlsar de milisegundos.

Hay proyectadas nuevas observaciones de Calvera, para resolver el misterio y esclarecer las características de ese cuerpo celeste. Al propio tiempo, se ha acometido la investigación de otras diez fuentes solitarias de rayos X que podrían resultar igualmente enigmáticas.

—Mark Alper

Catálisis heterogénea ¿Química adiabática?

Cálculos mecanocuánticos y experimentos de laboratorio ratifican la validez de una de las hipótesis fundamentales de la química teórica

Un catalizador es una sustancia que acelera la velocidad de una reacción química, sin llegar a formar parte del producto final de ésta. Para ello, el catalizador crea un camino alternativo en el que los reactivos crean productos intermedios, acelerando así la obtención de los productos finales de la reacción. Si el catalizador y los reactivos se encuentran en la misma fase (líquida, por ejemplo), hablamos de *catálisis homogénea.*

Mayor importancia técnica reviste la *catálisis heterogénea*. Aquí, el catalizador corresponde a una superficie sólida (en general metálica) y los reactivos se hallan en fase líquida o gaseosa. De ese tipo son los catalizadores que emplean los automóviles para procesar los gases de escape. La catálisis heterogénea condiciona nuestra vida diaria: el 90 por ciento de los procesos de fabricación de productos químicos a escala mundial emplean ese tipo de reacciones. En la industria química se usa para reducir la contaminación ambiental; se aplica también a la fabricación del amoníaco, un fertilizante básico para la agricultura y, por tanto, para la industria alimentaria que de ella se deriva.

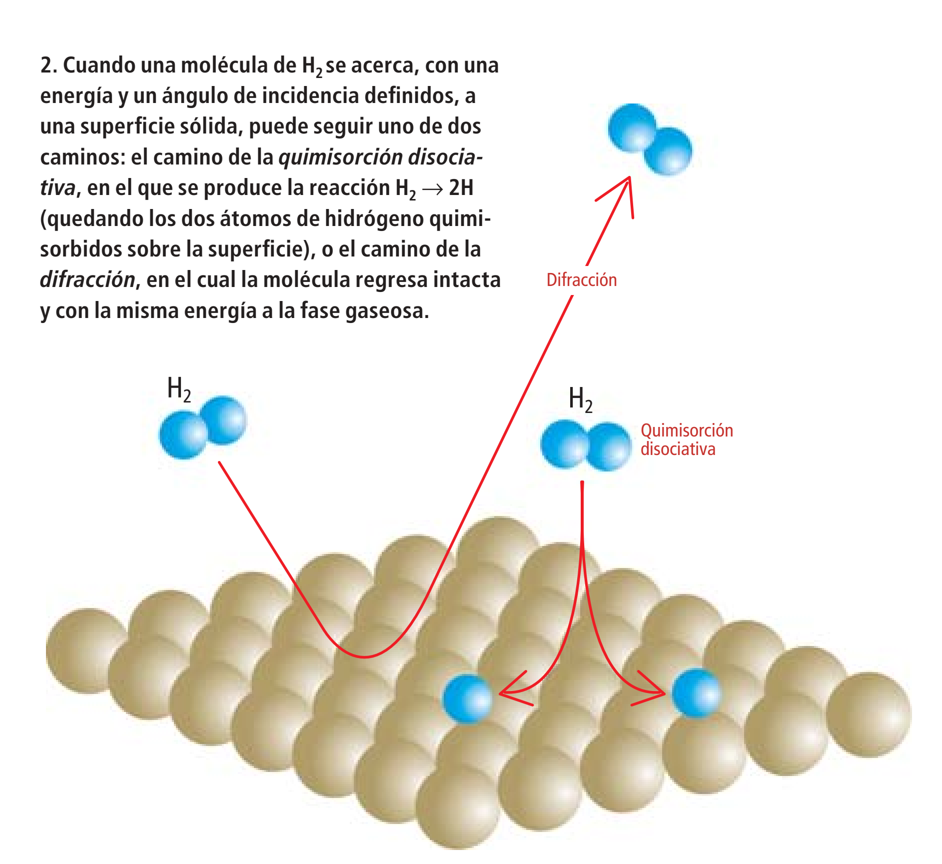
La catálisis suele tener lugar en un volumen cerrado que contiene la superficie sólida y por donde circulan las especies reactivas en un flujo continuo. Los átomos de la superficie forman enlaces químicos con los átomos de las moléculas incidentes, en un proceso de *quimisorción.* Asimismo, puede producirse una *quimisorción disociativa*: la superficie rompe los enlaces de las moléculas incidentes, haciendo que sus átomos constitutivos se adhieran a la superficie. Los átomos quimisorbidos se mueven sobre la superficie y se unen a otros átomos, formando así nuevas moléculas que finalmente abandonan la superficie (se "desorben"), en forma de producto final.

La capacidad para disociar moléculas es, en general, la principal propiedad que se busca en un catalizador. Si queremos formar amoníaco (NH_3) a partir de una mezcla de gases de hidrógeno (H_2) y nitrógeno (N_2), es necesario que ocurra primero la *quimisorción disociativa*. Para alcanzarla, deben interactuar dichos gases con una placa de hierro o de rutenio a temperaturas elevadas. Una vez disociadas las moléculas, los átomos de hidrógeno y nitrógeno se difunden sobre la superficie para formar moléculas de amoníaco.



1. En los automóviles, los gases de escape se procesan mediante catálisis heterogénea.

© STEFAN REDEL/*iStockphoto*



2. Cuando una molécula de H_2 se acerca, con una energía y un ángulo de incidencia definidos, a una superficie sólida, puede seguir uno de dos caminos: el camino de la *quimisorción disociativa*, en el que se produce la reacción $H_2 \rightarrow 2H$ (quedando los dos átomos de hidrógeno quimisorbidos sobre la superficie), o el camino de la *difracción*, en el cual la molécula regresa intacta y con la misma energía a la fase gaseosa.

ILUSTRACION DE E. PIJPER

La aproximación adiabática

Conocemos con bastante detalle el modo en que ocurren esos procesos a escala microscópica, al menos cuando se trata de reacciones modélicas (la ya mencionada producción de amoníaco y la oxidación de la molécula de CO para producir CO_2 que tiene lugar en los catalizadores de los automóviles). A ese conocimiento se ha llegado merced a los múltiples experimentos realizados en condiciones de vacío ultraalto, así como al desarrollo de métodos teóricos que han permitido abordar cálculos cuánticos precisos de reacciones entre gases y superficies sólidas.

Los modelos teóricos que se utilizan para el estudio de esos procesos químicos se basan en una hipótesis esencial: la *aproximación adiabática* o de Born-Oppenheimer (en honor de Max Born, premio Nobel de física en 1954, y J. Robert Oppenheimer, quienes la formularon en 1927). Su aplicación permite simplificar el procedimiento de cálculo que se emplea en la resolución de la ecuación de Schrödinger, la ley fundamental de la mecánica cuántica.

Según la *aproximación adiabática*, en la descripción de la disociación de una molécula, el movimiento de los núcleos atómicos puede separarse del movimiento de los electrones. Por la sencilla razón de que los núcleos, dotados de un peso mayor, se mueven más lentamente que los electrones; éstos se adaptan instantáneamente al movimiento nuclear. Con semejante enfoque podemos dejar de lado las excitaciones electrónicas o, lo que es lo mismo, considerar que los electrones permanecen, durante la reacción, en su estado energético fundamental.

La aplicación de la hipótesis de Born-Oppenheimer ha resultado determinante para el desarrollo de muchas áreas de la física y la química física, incluido el estudio de reacciones en fase gaseosa. Pero se ha cuestionado su aplicación en la descripción de reacciones sobre superficies sólidas. El interés por comprobar su validez es doble: por un lado, constituye una herramienta computacional de poderosa eficacia; por otro, carecemos de un método alternativo para realizar cálculos *no adiabáticos* en superficies sólidas.

Química de superficies

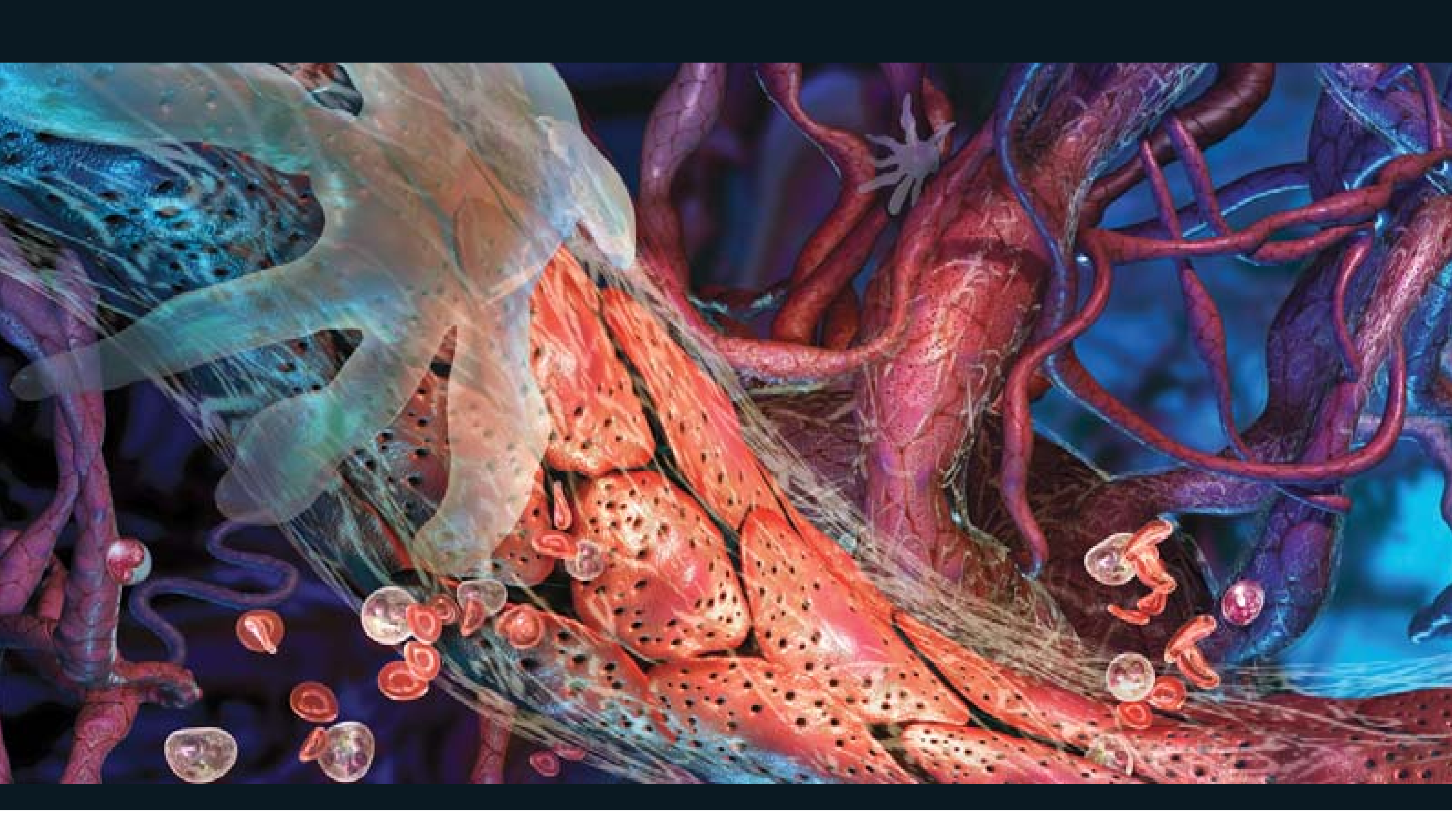
En un trabajo reciente se ha estudiado la validez de la *aproximación adiabática* en el estudio de la interacción entre una molécula de hidrógeno y una superficie metálica. Cuando una molécula de H_2 se acerca a una superficie sólida, compiten dos procesos: la *difracción* (la molécula "rebota" en la superficie y regresa a la fase gaseosa en una dirección determinada) y la ya mencionada *quimisorción disociativa*. La difracción de átomos o moléculas es una consecuencia del carácter ondulatorio de la materia; por tanto, la descripción de este fenómeno debe basarse sólo en las leyes de la mecánica cuántica. Para ello se requiere un conocimiento muy detallado de las fuerzas que gobiernan la interacción con la superficie, lo que ofrece un excelente escenario para comprobar la validez de la *aproximación adiabática.*

En el trabajo aludido se ha escogido la molécula de H_2 por ser la más sencilla de las que participan en reacciones catalíticas. Ello permite describir el proceso mediante modelos cuánticos exactos, es decir, que incluyen los seis grados de libertad que describen el sistema. Los cálculos teóricos se han llevado a cabo en el grupo de G. J. Kroes, de la Universidad de Leiden. La única aproximación empleada ha sido precisamente la *aproximación adiabática.* Los experimentos se han realizado en el Laboratorio de Superficies de la Universidad Autónoma de Madrid, donde se ha medido con exquisita precisión, y en un amplio rango de ángulos y energías incidentes, la difracción de moléculas de H_2 por una superficie de platino.

El excelente acuerdo obtenido entre teoría y experimento, para la difracción, así como para la disociación, demuestra que la aproximación de Born-Oppenheimer describe de forma adecuada la interacción entre H_2 y una superficie metálica.

Las conclusiones de ese estudio revisten el máximo interés. Abren perspectivas prometedoras sobre la aplicación de la *aproximación adiabática* al estudio de la interacción de moléculas de mayor complejidad como N_2 y CH_4 con superficies metálicas. Por esa vía nos acercamos un poco más a un objetivo soñado desde hace decenios: disponer de una herramienta de cálculo, basada íntegramente en la mecánica cuántica, que prediga el resultado de cualquier reacción de catálisis heterogénea.

Daniel Farías
Dpto. de Física de la Materia Condensada
Laboratorio de Superficies,
Universidad Autónoma de Madrid



TERAPIA VASCULAR PARA TRATAR EL CANCER

Los fármacos que normalizan la vascularización en el interior de un tumor generan, durante un lapso de tiempo limitado, condiciones propicias para atacarlo

Rakesh K. Jain

En 1974, siendo estudiante de doctorado, tuve ocasión de observar tumores malignos desde una perspectiva de lo más inusual. Trabajaba entonces en el laboratorio del difunto Pietro M. Gullino, en el Instituto Nacional del Cáncer. Allí se había desarrollado un innovador dispositivo experimental para estudiar la biología del cáncer: una masa tumoral conectada, mediante una arteria y una vena, al sistema circulatorio de una rata. Como ingeniero químico, decidí aprovechar esa oportunidad para realizar un experimento: inyectaría un fármaco al animal y mediría qué cantidad llegaba al tumor y qué cantidad lo atravesaba para volver al punto de partida. Los resultados fueron sorprendentes. La mayor parte de la sustancia inyectada en la rata ni siquiera entraba en el tumor. Para empeorar las cosas, la pequeña cantidad que sí llegaba a la neoformación se distribuía de manera irregular; en algunas regiones apenas se detectaba acumulación del fármaco.

De ello se desprendía una conclusión preocupante. Por pequeña que fuese la fracción de células tumorales que no recibiese una dosis adecuada de cualquier fármaco anticancerígeno suministrado, esas células sobrevivirían; tarde o temprano,

el tumor recidivaría. El ingeniero que había en mí se sintió entonces atraído por la idea de intentar comprender y resolver la aparente disfunción de la infraestructura tumoral, que planteaba un serio obstáculo para la administración de terapias contra el cáncer.

En el transcurso de los decenios siguientes, he venido investigando con mis colaboradores las causas que provocan el fallo de los vasos sanguíneos del interior de un tumor y el modo en que estos vasos aberrantes no sólo desbaratan los tratamientos contra el cáncer, sino que contribuyen también a algunas de las propiedades malignas de los tumores sólidos. Desarrollamos estrategias para normalizar la vascularización tumoral; las ensayamos con éxito en ratones.

Durante los experimentos, descubrimos cierto fenómeno paradójico: al aplicar un tipo de fármacos diseñados para destruir los vasos sanguíneos tumorales observamos que, en realidad, lo que hacían era repararlos, con la creación consiguiente de condiciones propicias para atacar el tumor con redoblada eficacia.

Por fin hemos empezado a ensayar esa hipótesis en pacientes con cáncer. Con frutos alentadores. Hemos observado la regresión de tumores en respuesta a una normalización del sistema vascular. Queda mucho trabajo por hacer antes de refinar esa estrategia y calibrar su aplicación en pacientes con distintos tipos de cáncer. Pero nuestros hallazgos sobre el restablecimiento de la vascularización han abierto vías también para el tratamiento de otros trastornos vasculares como la degeneración macular, una causa principal de ceguera.



1. LOS VASOS SANGUINEOS ABERRANTES (*izquierda*) se suman al caos que impera en el interior de un tumor; impiden que los fármacos lleguen hasta las células cancerosas. La normalización de esos vasos (*derecha*) los convierte en armas funcionales que pueden volverse en contra del tumor.

Un camino tortuoso

La senda que condujo a esos descubrimientos se inició pocos años después de completar mis estudios de doctorado. Empeñados en averiguar por qué los fármacos no penetraban de manera uniforme en los tumores, acometimos el seguimiento de cada etapa del proceso en roedores. Aplicando técnicas diversas, observamos el avance de los fármacos a medida que se iban introduciendo en los capilares tumorales, atravesaban la pared neoplásica hacia el tejido circundante y se introducían en las células cancerosas para abandonar el tumor. Desarrollamos métodos para seguir el rastro de moléculas, como el oxígeno, por el interior de los vasos sanguíneos y de los tejidos. Nos percatamos de la activación y desactivación de los genes en el interior de las células.

Desde el primer momento quedó claro que los vasos del interior de los tumores guardan

CONCEPTOS BASICOS

- Los vasos sanguíneos aberrantes y disfuncionales constituyen una señal característica de los tumores sólidos. Contribuyen a las propiedades malignas del cáncer e impiden que los fármacos alcancen las células tumorales y las ataquen.
- La normalización de los vasos tumorales facilita que las terapias contra el cáncer penetren en la masa tumoral y operen con mayor eficacia.
- Un hallazgo sorprendente: fármacos que se desarrollaron para destruir los vasos sanguíneos tumorales actúan reparándolos durante un lapso de tiempo. Ello abre una nueva vía para el tratamiento del cáncer y otras enfermedades asociadas a un sistema vascular aberrante.

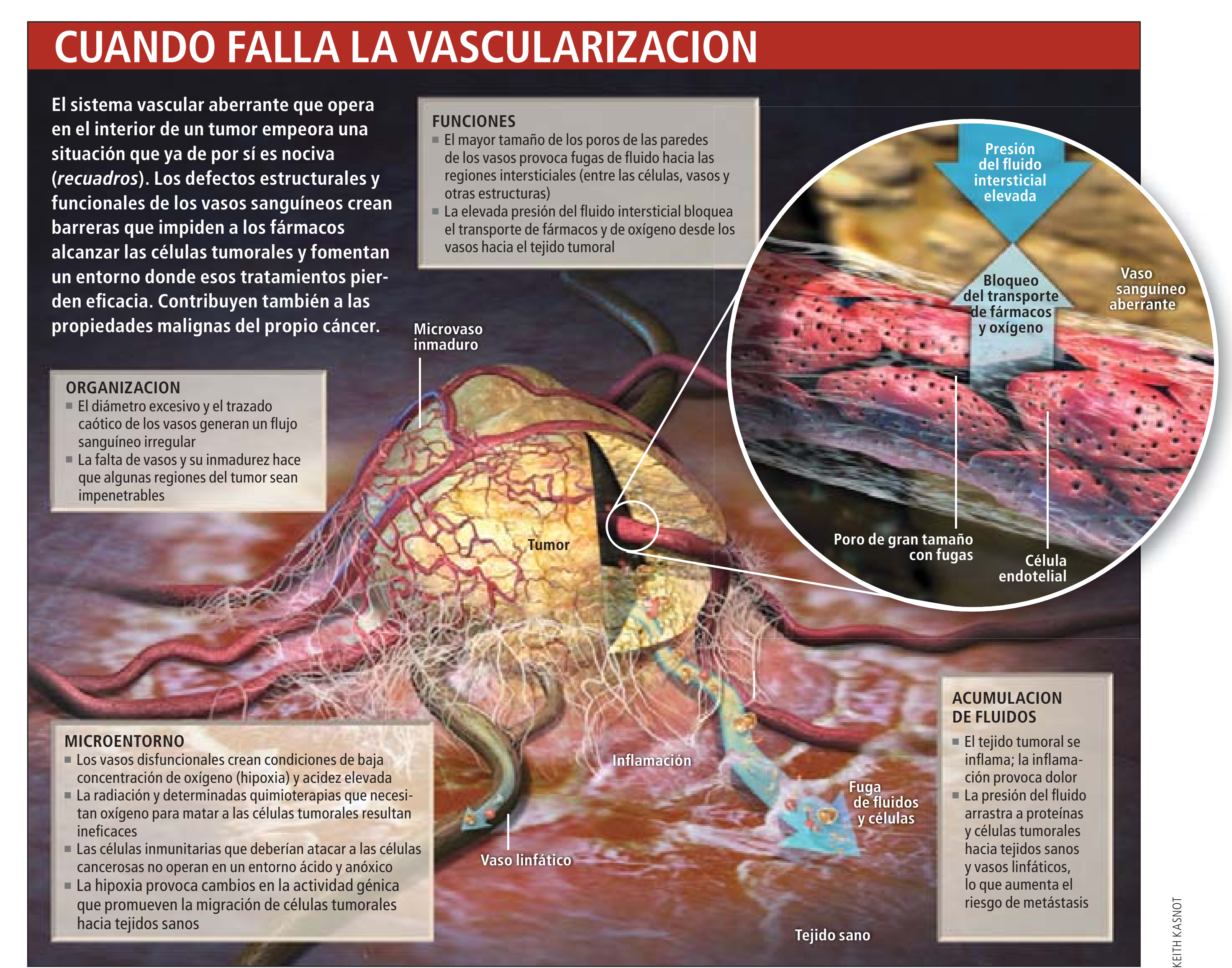
semejanza escasa con los vasos normales. Los tejidos sanos se nutren de vasos rectos que se ramifican de forma concertada para dar lugar a capilares cada vez menores y a microcapilares, creando un entramado extenso que suministra oxígeno y nutrientes a las células. Los tumores, que estimulan por su cuenta el crecimiento de nuevos vasos (angiogénesis), tienden a generar una maraña de vasos conectados de forma errática y con algunas ramas desmesuradas, multitud de microvasos inmaduros y externos, para dejar sin vascularización otras regiones del tumor.

Con los años, obtuvimos un esbozo de los procesos que gobiernan el movimiento de fluidos, fármacos y células por el interior del sistema vascular tumoral, así como las consecuencias de las anomalías. El panorama resultaba desolador. Los vasos del tumor no sólo presentaban un aspecto desorganizado, sino que eran extremadamente aberrantes en estructura y función. Si en unos vasos tumorales, la sangre fluía con facilidad, en otros persistía estática. En un vaso la sangre podía fluir en una dirección durante un tiempo, para cambiar luego de dirección. Ese patrón de flujos creaba por sí solo un obstáculo grave para la administración de fármacos. Además, algunas zonas de las paredes de los vasos eran demasiado porosas, mientras que otras se mostraban tupidas, lo que indicaba que los fármacos y demás moléculas que consiguieran penetrar en el sistema vascular serían distribuidos de forma irregular por el tejido tumoral circundante.

Cuando comenzamos a investigar las causas de esa porosidad no uniforme, descubrimos que en algunos tumores los poros de las paredes de los vasos sanguíneos alcanzaban un diámetro de una o dos micras, un tamaño que centuplicaba el de los poros de los vasos sanos. Por eso, los vasos son incapaces de mantener gradientes normales de presión a través de sus paredes. En condiciones normales, la presión

CUANDO FALLA LA VASCULARIZACION

El sistema vascular aberrante que opera en el interior de un tumor empeora una situación que ya de por sí es nociva (*recuadros*). Los defectos estructurales y funcionales de los vasos sanguíneos crean barreras que impiden a los fármacos alcanzar las células tumorales y fomentan un entorno donde esos tratamientos pierden eficacia. Contribuyen también a las propiedades malignas del propio cáncer.



KEITH KASNOT

hidrostática dentro de los vasos sanguíneos sanos es mucho mayor que la del tejido circundante. En los vasos tumorales, en cambio, al ser tan porosos, el fluido escapa y provoca el aumento de la presión exterior (presión intersticial) hasta igualar la presión interior.

Esa alteración del gradiente de presión impide que los fármacos alcancen las células tumorales. Además, la acumulación de líquido intersticial produce una inflamación en los tejidos tumorales y su entorno. En pacientes con cáncer cerebral, donde la expansión del tejido se encuentra limitada por el cráneo, la inflamación aludida se convierte en un problema grave que, a menudo, supone un riesgo vital. En pacientes con otros tipos de cáncer, el fluido exudado se acumula también en las cavidades corporales. Dondequiera que vaya, el fluido que rezuma de un tumor es portador de células y proteínas tumorales, que promueven el crecimiento de nuevos vasos sanguíneos y linfáticos en el tejido normal circundante y en los nódulos linfáticos; sirven, luego, de conductos para la propagación metastásica de las células cancerosas hacia otras partes del organismo.

Además de la dificultad de administrar fármacos a través del sistema vascular tumoral y de la acumulación de fluidos que provoca la porosidad de los vasos, las aberraciones de los vasos tumorales alteran el microentorno del interior del tumor. Dado que muchas regiones del tumor carecen de vascularización y los vasos existentes son incapaces de aportar suficiente oxígeno a los tejidos colindantes, predomina en el tumor un estado general de hipoxia y acidez elevada. A su vez, esa escasez de oxígeno promueve la agresividad de las células tumorales y su tendencia a la metástasis. Por su parte, las células inmunitarias, que deberían ayudar a combatir el tumor, se ven obstaculizadas por la acidez y no operan en condiciones hipóxicas. Tampoco funciona la radioterapia ni quimioterapias con fármacos que actúan mediante procesos químicos que necesitan el oxígeno para matar a las células cancerosas.

Lo que empezó siendo una investigación sobre las irregularidades en el flujo de fármacos por el interior de los tumores nos reveló que las aberraciones de los vasos sanguíneos tumorales obstaculizaban los tratamientos mediante mecanismos más complejos de lo que en un principio había imaginado. En 1994 expuse en estas mismas páginas lo que habíamos descubierto hasta entonces [*véase* “Barreras a la entrada de fármacos en los tumores sólidos”, por Rakesh K. Jain; Investigación y Ciencia, septiembre de 1994]. Esos hallazgos nos sugirieron una hipótesis de trabajo: si lográramos reparar la estructura y la función de los vasos tumorales, podríamos normalizar el microentorno tumoral y, en última instancia, mejorar los tratamientos contra el cáncer. Para llevar a cabo la normalización debíamos antes ahondar en las causas que provocan las alteraciones en los vasos tumorales y los factores que mantienen ese estado aberrante.

Restablecer el equilibrio

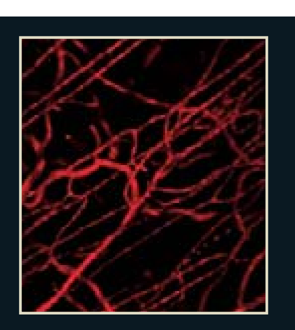
Comenzamos a examinar los factores moleculares implicados en la angiogénesis, incluido el factor de crecimiento del endotelio vascular (VEGF), el más potente de todos. El VEGF, descubierto por Harold Dvorak, de la Universidad de Harvard, promueve la supervivencia y proliferación de las células endoteliales, que forman el revestimiento interno de los vasos. Si abunda en demasía, se desarrollan vasos porosos (de ahí que inicialmente se denominara “factor de permeabilidad vascular”). Sin embargo, en los tejidos normales, la acción conjunta de VEGF y otros agentes promotores del crecimiento viene contrarrestado por la actividad de moléculas antiangiogénicas naturales, como la trombospondina, que inhiben el crecimiento de los vasos sanguíneos.

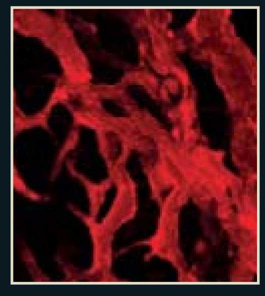
Sanos o enfermos, los tejidos que necesitan nuevos vasos sanguíneos incrementan la síntesis de factores angiogénicos, reducen la producción de inhibidores o ambas cosas, pero siempre inclinando la balanza a favor de la angiogénesis. En los procesos sanos, como la cicatrización de heridas, una vez se han constituido los nuevos vasos se acaba restableciendo el equilibrio entre los factores de crecimiento y los inhibidores. Pero en los tumores y en otros tejidos enfermos crónicos, el desequilibrio persiste y los vasos sanguíneos crecen de manera cada vez más aberrante.

Puesto que el VEGF abunda en la mayoría de los tumores sólidos, sospeché que, si encontrábamos la forma de eliminar el exceso de VEGF o de interferir en las señales de crecimiento que éste genera, se restablecería el equilibrio y se normalizaría el sistema vascular tumoral. En opción alternativa, el aumento de la concentración de los factores antiangiogénicos lograría el mismo efecto de normalización vascular. Postulé también que los vasos tratados de cualquiera de esas dos formas no permanecerían siempre normalizados: acabarían por ser destruidos si los inhibidores fuesen lo suficientemente potentes o se tornarían aberrantes en el caso de que los tumores fabricasen otros estimuladores, como el factor de crecimiento básico de los fibroblastos (bFGT), que remeda a VEGF en buena parte de sus funciones. La única manera de comprobarlo consistía en

El autor

Rakesh K. Jain ocupa la cátedra Andrew Werk Cook de biología tumoral y dirige el Laboratorio Edwin L. Steele de biología tumoral en el departamento de radiación oncológica del Hospital General de Massachusetts y en la Escuela Médica de Harvard. Su investigación aúna la biología, las técnicas de obtención de imágenes, la ingeniería y las matemáticas; se centra en el estudio de los vasos sanguíneos, los vasos linfáticos y el entorno tisular, así como en las aplicaciones clínicas de la investigación básica.





2. LOS VASOS SANGUINEOS del lecho capilar del músculo de un ratón normal (*arriba*) y del interior de un tumor de ratón (*abajo*) se distinguen con nitidez. Los vasos tumorales se ramifican de forma errática, su diámetro varía con la longitud y suelen presentar un tamaño excesivo (características que contribuyen a que el flujo sanguíneo sea irregular).

RECUPERAR EL EQUILIBRIO

Al normalizar la vascularización tumoral se optimizan las condiciones para que los fármacos anticancerígenos alcancen y operen sobre las células tumorales. Muchas de las aberraciones de los vasos tumorales se deben a que los factores que estimulan su crecimiento (angiogénicos) superan a los que lo inhiben (antiangiogénicos), que suelen controlar la proliferación vascular. Los medicamentos antiangiogénicos que bloquean al principal factor estimulador del crecimiento, VEGF, hacen que se restablezca el equilibrio que asegura la normal formación de los vasos y su mantenimiento. La normalización no debe prolongarse de forma indefinida, ya que los fármacos pueden acabar destruyendo la mayor parte de los vasos y el tumor se puede hacer resistente a ellos.

▼ CRECIMIENTO Y MANTENIMIENTO DE LOS VASOS SANOS. Las células endoteliales forman vasos sanguíneos en respuesta a señales procedentes de moléculas que promueven o inhiben el crecimiento. Los pericitos (células que envuelven a los vasos) y la membrana basal que rodea los vasos se encargan del mantenimiento.

Pericito
Membrana basal
Célula endotelial
VEGF
Receptor
Factores que inhiben el crecimiento
Factores que estimulan el crecimiento

VACULARIZACION NORMAL
El equilibrio entre las señales angiogénicas y las antiangiogénicas da lugar a un entramado organizado, con vasos de gran tamaño que se ramifican de forma regular generando vasos más pequeños.

Inhibidores
Promotores

VACULARIZACION ABERRANTE
El exceso de factores angiogénicos, sobre todo VEGF, provoca un crecimiento desmesurado que genera vasos organizados al azar y con un tamaño excesivo junto a multitud de microvasos disfuncionales.

Inhibidores
Promotores

KEITH KASNOT (*ilustraciones*); JEN CHRISTIANSEN (*balancines*); ADAPTADO DE ILUSTRACIONES ORIGINALES POR LANCE L. MUNN EN "NORMALIZING TUMOR VASCULATURE WITH ANTI-ANGIOGENIC THERAPY: A NEW PARADIGM FOR COMBINATION THERAPY," POR RAKESH K. JAIN, EN *NATURE MEDICINE*, VOL. 7, N.º 9; SEPTEMBER DE 2001

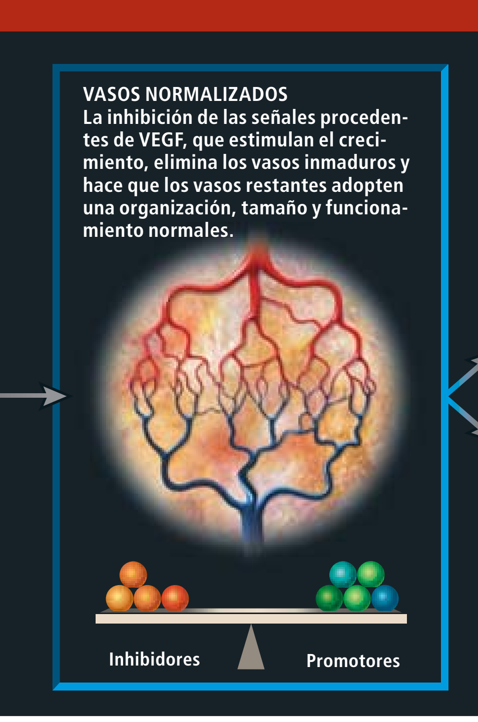
ensayar en tumores los efectos de sustancias antiangiogénicas.

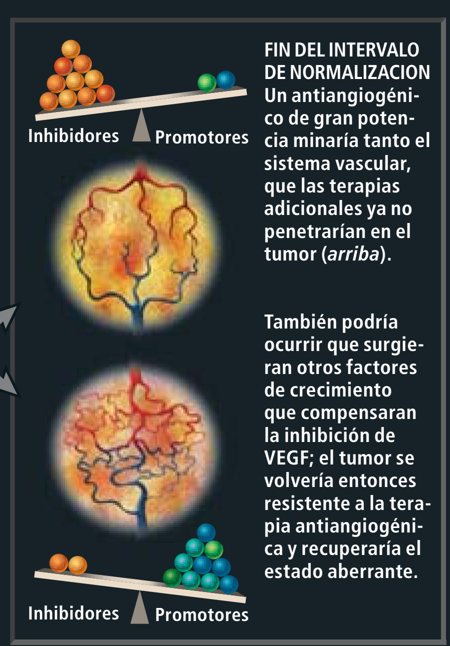
En 1995 se estaban ya desarrollando fármacos basados en anticuerpos que neutralizaban los efectos de VEGF. Pudimos, pues, utilizarlos para ensayar nuestra estrategia en ratones. Algunos de los anticuerpos se unían directamente a VEGF, con lo que minaban su capacidad para enviar señales de crecimiento a las células endoteliales mediante la unión a los receptores que se alojan en la superficie celular. Otros anticuerpos se unían a los receptores de VEGF, lo que impedía que el factor de crecimiento estableciese contacto. Para nuestra sorpresa, ambas formas de inhibir al VEGF eliminaban parte de los vasos sanguíneos inmaduros e ineficaces, característicos de numerosos tumores e inducían la remodelación de los vasos restantes; empezaban a parecerse a los de un sistema vascular normal. Los vasos sanguíneos normalizados habían reducido la porosidad, la dilatación y el caos estructural.

Observamos también mejoras funcionales: menor presión del fluido intersticial, mayor oxigenación y mayor penetración de los fármacos.

Andando el tiempo, otros investigadores obtuvieron en animales resultados semejantes. Con todo, aún no podíamos saber si se elicitarían idénticas respuestas en humanos. Muchos expertos se mostraban escépticos ante nuestra propuesta. Era comprensible. A finales del decenio de los noventa, cuando postulé la hipótesis de la normalización de los vasos tumorales, se habían estado desarrollando (en las universidades y en la industria) fármacos degradadores de los vasos sanguíneos. Tales pesquisas se basaban en la hipótesis lanzada en 1971 por Judah Folkman, de Harvard, según la cual el crecimiento del tumor se detendría si se privaba de nutrientes al tumor mediante fármacos antiangiogénicos [*véase* "Angiogénesis terapéutica", por Rakesh K. Jain y Peter Carmeliet; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, febrero de 2002]. De hecho, el medicamento Avastin, aprobado en 2004 por la Agencia Federal de Fármacos y Alimentos para el tratamiento contra el cáncer, corresponde a un anticuerpo que neutraliza al VEGF y que se desarrolló como agente antiangiogénico con este fin.

Los experimentos de laboratorio y los ensayos clínicos han demostrado que el Avastin destruye los vasos sanguíneos en tumores animales y humanos, aunque, cuando se utiliza solo, no incrementa la supervivencia global de pacientes con cáncer. Durante un ensayo clínico crucial que llevó a su aprobación, el Avastin aumentó la supervivencia de pacientes en un estado avanzado de cáncer colorrectal, pero *sólo* cuando se administraba junto con la quimioterapia estándar. Ese resultado positivo resultó entonces paradójico, ya que se suponía que un fármaco que se había proyectado y ad-





ministrado para destruir los vasos sanguíneos debería reducir la eficacia de la quimioterapia (que requiere vasos sanguíneos funcionales para llegar a las células tumorales). De hecho, algunos trabajos habían demostrado que los antiangiogénicos entorpecen la radioterapia y la quimioterapia. ¿Cómo conciliar hallazgos tan contradictorios?

Nuestro grupo tuvo ocasión de deshacer la aporía mediante el examen de la estructura y la función de los vasos tumorales de pacientes con cáncer colorrectal que tomaban Avastin combinado con radioterapia y quimioterapia. Participaban en un ensayo clínico realizado en 2002, financiado por el Instituto Nacional del Cáncer y dirigido por Christopher Willet, hoy en el hospital de la Universidad Duke. Los cambios que observamos en el sistema vascular tumoral de aquellos pacientes no se limitaban a la destrucción de los vasos.

Dos semanas después de una inyección de Avastin, el flujo sanguíneo del tumor se redujo entre un 30 y un 50 por ciento en seis pacientes tratados de forma consecutiva. Disminuyeron también la densidad de los microvasos, el número total de vasos sanguíneos y la presión del fluido intersticial de los tumores. La apoptosis (muerte celular programada, indicativa de una falta de oxígeno y nutrientes) aumentó en las células tumorales sin acceso al sistema vascular.

Sin embargo, no se observó ninguna disminución del consumo energético del tumor (que se mide a partir de la asimilación de un análogo de la glucosa), que es lo que cabría esperar si éste se estuviese muriendo de inanición. En vez de ello, parecía que los vasos tumorales restantes se habían vuelto más eficientes a la hora de satisfacer las necesidades energéticas de las células cancerosas supervivientes. Y no sólo eso, la proliferación de las células cancerosas aumentó en algunos tumores, lo que indicaba que tenían acceso a una mejor vascularización y a un microentorno tisular más normal. Aunque en principio no es deseable que aumente la proliferación celular cuando se trata de células cancerosas, ese estado las haría más vulnerables a los fármacos utilizados en quimioterapia, pues suelen dirigirse contra las células que se están dividiendo.

En conjunto, esos resultados proporcionaron una primera instantánea de los efectos del Avastin. Empezábamos a entender el modo en que éste podría potenciar la eficacia de la radiación y la quimioterapia durante cierto lapso de tiempo. Dado que el medicamento bloquea el VEGF, parte del sistema vascular del tumor se elimina de forma inmediata, pero los vasos que permanecen se vuelven menos aberrantes. Además de mejorar el microentorno del tumor, esos vasos normalizados facilitan la administración de fármacos y, por tanto, hacen que las células que sobreviven sean más sensibles a los tratamientos. Así pues, el restablecimiento de la vascularización en el interior del tumor genera, durante un lapso de tiempo limitado, condiciones propicias para aumentar la eficacia de toda una serie de terapias contra el cáncer.

El momento propicio

Para poder aplicar un tratamiento antiangiogénico combinado con radioterapia y quimioterapia, un oncólogo necesitaría saber en qué momento se empiezan a normalizar los vasos tumorales del paciente y cuánto tiempo permanecen en ese estado. Volvimos a experi-

3. VASOS TUMORALES procedentes de un cáncer de colon crecen sobre un polímero. Forman una masa densa y cristalina, reflejo de una profusión caótica de microvasos. Por contra, los grandes huecos indican regiones del tumor carentes de irrigación sanguínea.

DE “GEOMETRIC RESISTANCE AND MICROVASCULAR NETWORK ARCHITECTURE OF HUMAN COLORECTAL CARCINOMA”, POR J. R. LESS, M. C. POSNER, T. C. SKALAK, N. WOLMARK Y R. K. JAIN, EN *MICROCIRCULATION*, VOL. 4, N.º 1; 1997



mentar sobre ratones para caracterizar mejor ese "intervalo de normalización".

Tratamos tumores cerebrales con un anticuerpo diseñado para bloquear el principal receptor de VEGF de las células endoteliales. La normalización de los vasos comenzó al cabo de un día. Durante el intervalo de normalización (que duró sólo unos cinco o seis días), aumentó la oxigenación del tumor y la radioterapia mostró una eficacia máxima. En otros estudios con animales se han obtenido resultados semejantes.

De hecho, eran tantos los datos que respaldaban nuestro modelo terapéutico, que tuvimos ocasión de ponerlo a prueba en otro ensayo clínico financiado por el Instituto Nacional del Cáncer y terminado hace poco más de un año. Encabezado por Tracy Batchelor y Gregory Sorensen, del Hospital General de Massachusetts, el ensayo incluía a 30 pacientes con recidiva de un tumor cerebral (glioblastoma) que se había sometido a cirugía agresiva, radiación y quimioterapia; su esperanza de vida era inferior a los seis meses.

Recibieron una dosis oral diaria de Recentin, un fármaco experimental que inhibe a los tres principales receptores celulares de VEGF. Mediante técnicas avanzadas para la obtención de imágenes, realizamos un seguimiento de los tumores. La reducción del diámetro de los vasos y de su porosidad (ambas indicativas de normalización vascular) se mantuvieron durante al menos 28 días; otras señales de normalización persistieron a lo largo de los cuatro meses que duró el estudio. Además, de acuerdo con nuestra hipótesis, la normalización iba acompañada de una rápida disminución de la inflamación, en el tumor y en los tejidos circundantes; este efecto persistía siempre y cuando los pacientes tomasen Recentin. Sin embargo, dada la gravedad de los efectos secundarios de la inhibición de VEGF, durante el ensayo algunos pacientes solicitaron una interrupción del tratamiento; ello nos permitió observar la reaparición de las aberraciones vasculares en el tumor cuando dejaron de tomar Recentin y la restauración de la normalidad al reiniciar el tratamiento.

A partir de esos resultados, se determinó la duración del intervalo de normalización vascular en humanos. Asimismo, se han aplicado al diseño de un ensayo clínico mayor (con 300 pacientes), que se propone definir con más precisión los efectos del Recentin, con y sin quimioterapia, en el tratamiento del glioblastoma. También estamos estudiando el efecto de fármacos antiangiogénicos combinados con otras terapias al uso en casos recién diagnosticados y en tumores recurrentes de otros tipos de cáncer.

Otro de nuestros proyectos se centra en la prolongación del intervalo de normalización, que ampliaría de meses a años las mejoras en la supervivencia. Cualquier estrategia para reparar los vasos debe tener en cuenta que el simple bloqueo de VEGF no siempre basta para conseguir o mantener la normalización vascular, ya que los tumores sortean la pérdida de señales del VEGF mediante la sustitución por otros factores de crecimiento. Por ejemplo, conforme crecen, los tumores tienden a fabricar una amplia gama de moléculas angiogénicas, además de VEGF, de modo que los vasos quizá pierden de forma progresiva la sensibilidad hacia tratamientos como el Avastin.

En pacientes con cáncer de colon, por ejemplo, descubrimos que los niveles en sangre de VEGF y PlGF (factor de crecimiento placentario), una molécula similar, crecían cuando se eliminaba el exceso de VEGF con

Reparación vascular: más allá del cáncer

En el mundo hay cientos de millones de personas que sufren enfermedades no cancerosas asociadas a un sistema vascular aberrante. La modificación del crecimiento de los vasos sanguíneos y de su función podría convertirse en una pieza fundamental del arsenal terapéutico contra tales patologías. Los fármacos que normalizan la vascularización entrañan un gran potencial médico.

Entre las enfermedades más extendidas recordemos la aterosclerosis, una alteración de las arterias que se caracteriza por una acumulación de placas de grasa en las paredes internas de los vasos sanguíneos. En el interior de las placas se acumulan células sanguíneas inflamatorias y otros detritus que, de forma gradual, van agrandando la lesión. En el interior de esa masa en crecimiento surgen nuevos vasos sanguíneos para suministrar nutrientes, como ocurre en un tumor. Esos vasos nuevos comparten características aberrantes con los vasos tumorales, como la porosidad y la desorganización. Por tanto, los agentes antiangiogénicos deberían, en principio, normalizar los vasos del interior de las placas, lo que estabilizaría las lesiones, detendría su expansión y reduciría la posibilidad de que el vaso acabara reventando.

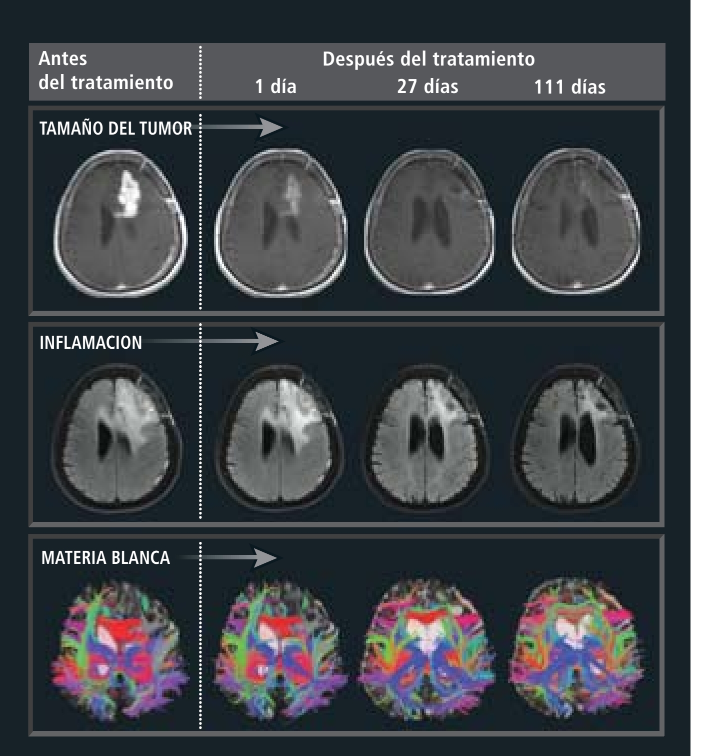
Enfermedades oculares como la retinopatía diabética y la "forma húmeda" de la degeneración macular asociada a la edad (DMAE) se deben también a aberraciones vasculares semejantes a las que se observan en tumores. La forma húmeda de la DMAE se caracteriza por la porosidad que presentan los vasos sanguíneos de la retina en la zona posterior del ojo. Como resultado, la sangre rezuma hacia el tejido circundante, lo que provoca una pérdida parcial o total de la visión. Hoy en día hay más de nueve millones de estadounidenses afectados; no es de extrañar, pues, que la principal aplicación de los efectos reparadores de los fármacos antiangiogénicos, a extramuros de la oncología, se haya realizado en el tratamiento de la forma húmeda de la DMAE. Ya se han aprobado dos medicamentos, Lucentis y Macugen (inhibidores del VEGF), para tratar esa enfermedad. Operan, muy probablemente, mediante la normalización de los vasos porosos.

Principios de normalización que pueden resultar útiles también en el control de enfermedades que provocan la acumulación de fluidos (edemas), en la ingeniería de tejidos y en la medicina regenerativa, que precisan de la creación y mantenimiento de un sistema vascular eficiente.



LA FORMA HUMEDA de la DMAE afecta a la mácula, una región de la retina situada en la parte posterior del ojo, que en un ojo sano ofrece un aspecto ligeramente oscuro (*izquierda*). La degeneración macular se debe a una vascularización excesiva: los vasos aberrantes rezuman sangre (*derecha*) hacia el tejido circundante, oscureciendo la visión.

KANG ZHANG Y JAMES GILMAN



4. LA RESPUESTA DE UN TUMOR CEREBRAL a la terapia antiangiogénica refleja algunos de los efectos de la normalización vascular. Las imágenes obtenidas por resonancia magnética del cerebro de un paciente un día antes de empezar el tratamiento y a intervalos sucesivos muestran una región de color blanco cuyo tamaño se va reduciendo: corresponde al tumor maligno (*arriba*). En otro conjunto de imágenes se observa la desaparición del fluido acumulado en esa región (*medio*). A medida que disminuye el edema provocado por el tumor, se reduce la compresión del tejido cerebral, lo que provoca la expansión de los tractos fibrosos de materia blanca (*abajo*, coloreados en función de la región cerebral).

Avastin; ello sugiere que el tumor u otros tejidos respondieron mediante el aumento de la producción de esos factores. En pacientes con glioblastoma recurrente, la concentración sérica de multitud de moléculas angiogénicas aumentaba a medida que los tumores dejaban de responder al Recentin.

Tal diversificación de las señales estimuladoras del crecimiento indica que el reto del oncólogo consistirá en formular cócteles farmacológicos a la medida del perfil molecular de los tumores primarios y metastásicos del paciente y adaptados a los cambios que, con el tiempo, se puedan producir en esos perfiles. Sin embargo, las terapias disponibles para promover la normalización vascular no se limitan a fármacos dirigidos contra VEGF u otros factores de crecimiento. Por ejemplo, hemos demostrado en ratones que el fármaco Herceptin, un anticuerpo dirigido contra HER2 (proteína de superficie de las células tumorales) que se administra a la cuarta parte de las mujeres con cáncer de mama, provoca las mismas respuestas que un cóctel antiangiogénico y normaliza los vasos tumorales. De forma indirecta, Herceptin disminuye la producción celular de diversas moléculas angiogénicas, al tiempo que incrementa la síntesis trombospondina-1, un antiangiogénico.

Además de identificar medicamentos, nuevos o ya existentes, que fomenten la normalización vascular, deben desarrollarse métodos, asequibles y poco invasivos, que faciliten el seguimiento del proceso de normalización y, por tanto, la optimización del tratamiento. Por ello hemos estado trabajando en la identificación de biomarcadores: señales fácilmente detectables que reflejan lo que está sucediendo en el interior de un tumor y, por tanto, revelan el momento de inicio y la duración del intervalo de normalización. Por ejemplo: proteínas presentes en el torrente sanguíneo o en la orina cuya concentración aumente o disminuya durante ese lapso de tiempo.

La acción normalizadora de los fármacos antiangiogénicos no desmerece el propósito original para el que fueron desarrollados. Si un medicamento es tan potente y específico que logra destruir una fracción del sistema vascular tumoral suficiente para que el tumor entero acabe muriendo de inanición y salvar así la vida del paciente, nadie cuestionará su éxito. Pero la posibilidad de usar esos fármacos para la reparación vascular los convierte en valiosas herramientas para otros enfoques terapéuticos. A largo plazo, esa investigación beneficiará también a los millones de personas en todo el mundo que padecen degeneración macular asociada a la edad, aterosclerosis y otras enfermedades provocadas por un sistema vascular aberrante.

Hace más de 30 años, cuando me propuse desentrañar la lógica de los tortuosos y aberrantes vasos sanguíneos tumorales, nunca me imaginé hacia dónde conduciría ese camino. Ni tampoco hubiese imaginado que llegaría un día en que un paciente aquejado de una enfermedad asociada a una disfunción vascular podría entrar en un hospital, medirse los niveles de diversos biomarcadores y, a continuación, recibir un tratamiento personalizado con medicamentos que normalizan y reparan la vascularización. Ese día parece estar más cerca que nunca.

Bibliografía complementaria

NORMALIZATION OF THE TUMOR VASCULATURE: AN EMERGING CONCEPT IN ANTI-ANGIOGENIC THERAPY. Rakesh K. Jain en *Science*, vol. 307, págs. 58-62; enero de 2005.

LESSONS FROM PHASE III CLINICAL TRIALS OF ANTI-VEGF THERAPY FOR CANCER. Rakesh K. Jain, Dan G. Duda, Jeffrey W. Clark y Jay S. Loeffler en *Nature Clinical Practice Oncology*, vol. 3, n.º 1, págs. 24-40; enero de 2006.

ANGIOGENESIS IN BRAIN TUMORS. Rakesh K. Jain y col. en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 8, págs. 610-622; agosto de 2007.

ANTIANGIOGENIC THERAPY FOR NORMALIZATION OF ATHEROSCLEROTIC PLAQUE VASCULATURE: A POTENTIAL STRATEGY FOR PLAQUE STABILIZATION. Rakesh K. Jain y col. en *Nature Clinical Practice Cardiovascular Medicine*, vol. 4, n.º 9, págs. 491-503; septiembre de 2007.

Hacia 2050 la energía solar podría acabar con la dependencia norteamericana del crudo extranjero y rebajar de forma drástica las emisiones de gases de invernadero

Ken Zweibel, James Mason y Vasilis Fthenakis



- La sustitución masiva de las centrales de carbón, petróleo, gas natural y energía nuclear por plantas de energía solar podría suministrar, allá por 2050, el 69 por ciento de la electricidad de EE.UU. y el 35 por ciento de su energía total.
- Tendría que cubrirse con paneles de células fotovoltaicas una extensa superficie en el sudoeste de EE.UU. La energía excedente generada por el día se almacenaría en forma de aire comprimido en cavernas subterráneas para extraerla en horas nocturnas.
- También se construirían grandes plantas de concentración de energía solar.
- Una nueva red básica de transmisión en corriente continua distribuiría electricidad de origen solar por todo el país.
- Sería preciso aportar 420.000 millones de dólares desde 2011 hasta 2020 para financiar la infraestructura y conseguir que su coste sea competitivo.

Los precios de la gasolina y el gasóleo de calefacción doméstica seguirán por las nubes. Las razones son evidentes: los EE.UU. guerrean en Oriente Medio, al menos en parte, para proteger sus intereses en el petróleo; en China, India y otros países crece con rapidez la demanda de combustibles fósiles, y en el horizonte ya se vislumbran encarnizadas luchas por la energía. Mientras tanto, las plantas térmicas en las que se quema carbón, petróleo y gas natural, así como los omnipresentes vehículos, emiten a la atmósfera millones de toneladas al año de contaminantes y gases de efecto invernadero.

Cargados de buenas intenciones, los científicos, ingenieros, economistas y políticos han propuesto diversas medidas que podrían reducir ligeramente el uso de combustibles fósiles y las emisiones que desprenden. Pero no son suficientes. Se necesita un plan audaz para librarse de los combustibles fósiles. Nuestro análisis da una respuesta lógica: el viraje radical hacia la energía solar.

El potencial de la energía solar desborda todos los límites. En 40 minutos, los rayos solares traen a la Tierra una energía equivalente al consumo del planeta durante un año. Los EE.UU. tienen la suerte de contar con enormes recursos: al menos 650.000 kilómetros cuadrados de terrenos en su sudoeste se prestan bien a la instalación de plantas de energía solar; reciben al año más de 5000 trillones de joule de radiaciones solares. Aunque sólo el 2,5 por ciento se transformara en electricidad, ésta equivaldría al consumo total de energía del país en 2006.

La conversión a energía solar exigiría cubrir vastas extensiones de terreno con paneles fotovoltaicos y concentradores solares para calefacción. Además habría que construir una red básica de transmisión en corriente continua para transportar esa energía por todo el país con un buen rendimiento.

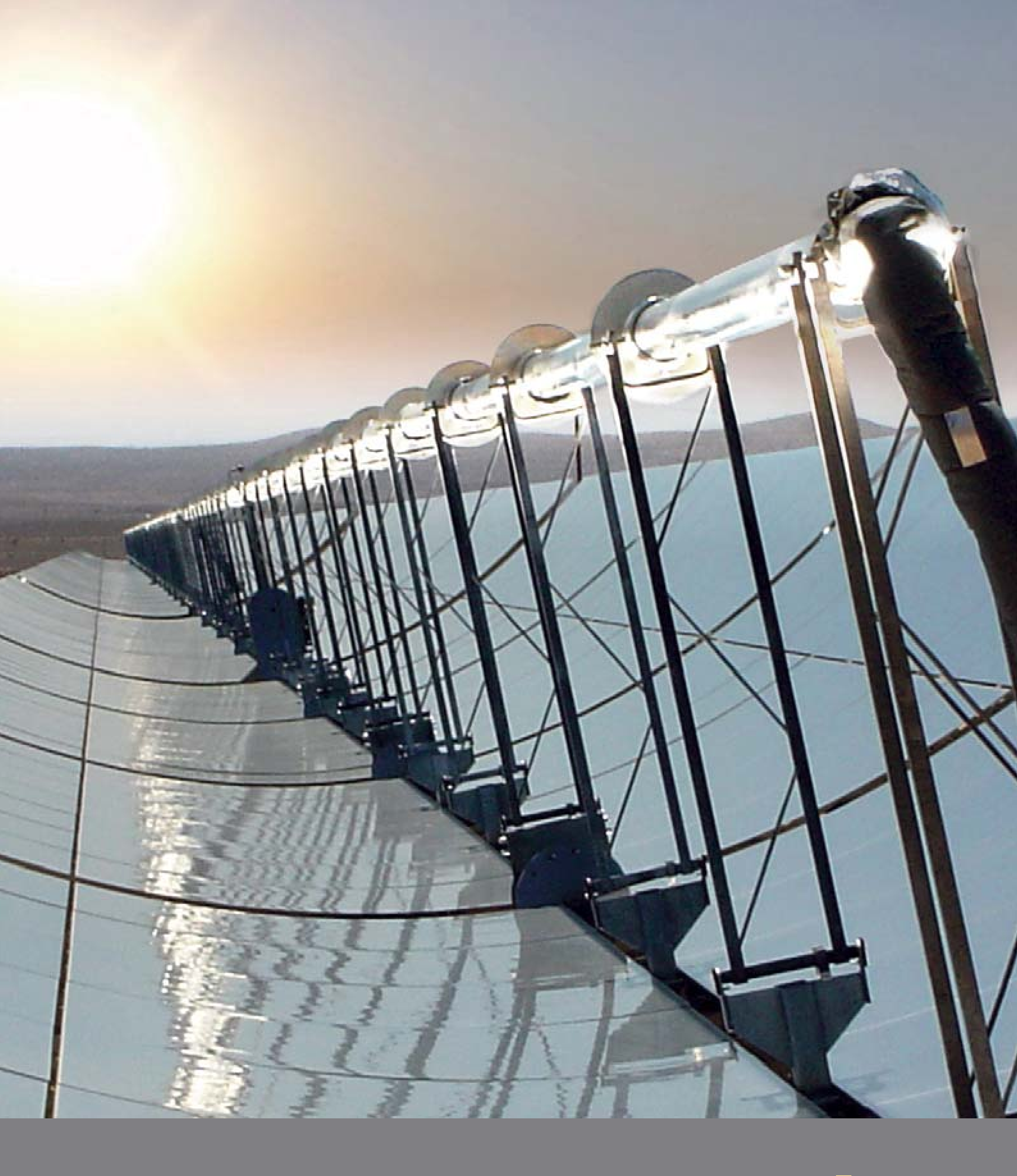
Las técnicas necesarias están en nuestras manos. A continuación presentamos un magno proyecto que hacia 2050 suministraría, mediante energía solar, el 69 por ciento de la electricidad y el 35 por ciento de la energía total (incluido el transporte) consumida en EE.UU. Prevemos que esa energía se vendería a los consumidores a tarifas equivalentes a las que actualmente rigen para las fuentes de energía ordinarias: alrededor de cinco centavos de dólar por kilowatt-hora (kWh). Si, además, se desarrollaran generadores de energía eólica, geotérmica y de la biomasa, a finales del siglo podría cubrirse con energía renovable hasta el 100 por ciento del consumo eléctrico nacional y el 90 por ciento de toda su energía.

El gobierno federal tendría que invertir más de 400.000 millones de dólares en los próximos 40 años para alcanzar el objetivo de 2050. Una inversión cuantiosa, pero sobradamente productiva. Las plantas solares gastan muy poco o ningún combustible, lo que ahorra miles de millones año tras año. La infraestructura creada desplazaría 300 grandes centrales térmicas de carbón y otras 300 de gas natural, con todos los combustibles que consumieran. La ejecución del proyecto suprimiría de hecho toda la importación de crudo: se reducirían radicalmente los déficits comerciales de EE.UU. y se mitigarían las tensiones políticas en Oriente Medio y otros lugares del mundo. Como las técnicas solares apenas si contaminan, las emisiones de gases de invernadero se reducirían en el monto de las correspondientes a las centrales térmicas sustituidas: 1700 millones de toneladas por año. Otros 1900 millones de toneladas desaparecerían al reemplazar los automóviles de gasolina por vehículos híbridos recargables, gracias a la red de energía solar. En EE.UU. las emisiones de dióxido de carbono caerían un 62 por ciento con respecto a los niveles de 2005, lo que supondría un gran frenazo del calentamiento global.

Parques fotovoltaicos

En los últimos años han bajado notablemente los costes de producción de células y módulos fotovoltaicos, abriéndose así camino a las instalaciones a gran escala. Existen diversos tipos de células, pero los módulos menos costosos se realizan hoy en película fina de telururo de

SCHOTT AG/COMMERCIAL HANDOUT/EPA/CORBIS



Un proyecto solar

cadmio. Para suministrar electricidad a seis centavos por kWh, tales módulos deberían realizar la conversión eléctrica con un rendimiento del 14 por ciento y su instalación no debería costar más de 1,20 dólares por watt de capacidad. Los módulos actuales rinden el 10 por ciento; el sistema instalado cuesta en torno a 4 dólares por watt.

Sin duda hace falta progresar, pero la técnica avanza velozmente; en los últimos 12 meses los rendimientos comerciales han subido del 9 al 10 por ciento. Sin olvidar que, a medida que los módulos se perfeccionen, los paneles fotovoltaicos resultarán más rentables para los propietarios de viviendas, lo que reducirá su demanda de electricidad en horas diurnas.

Con nuestro proyecto, hacia 2050 se producirían casi 3000 gigawatt (3×10^{12} watt) mediante técnicas fotovoltaicas. Para ello habría que instalar unos 80.000 kilómetros cuadrados de paneles. Aunque parezca una superficie enorme, las instalaciones ya existentes indican que se necesita menos terreno para producir un gigawatt-hora de energía solar en el sudoeste de Estados Unidos que para una planta térmica de carbón en una comarca minera. Los estudios del Laboratorio Nacional de Energías Renovables, en Golden, Colorado, demuestran que en el sudoeste hay tierra más que suficiente sin recurrir a zonas ecológicamente sensibles, centros de población o terrenos difíciles. Jack Lavelle, portavoz del Departamento de Conservación de Aguas en Arizona, ha señalado que más del 80 por ciento de las tierras de su estado no son de propiedad privada y que Arizona tiene gran interés en explotar su potencial de energía solar. La naturaleza benigna de las plantas fotovoltaicas (no consumen agua, por ejemplo) debería reducir al mínimo las preocupaciones ecológicas.

El principal requisito, pues, es elevar hasta el 14 por ciento el rendimiento del módulo. Ciertamente, los módulos comerciales nunca alcanzarán los rendimientos conseguidos en laboratorios, pero las células de telururo de cadmio que se construyen en el citado Centro Nacional de Colorado ya trabajan al 16,5 por ciento y siguen mejorando. Al menos un fabricante, First Solar, de Perrysburg, Ohio, ha elevado del 6 al 10 por ciento el rendimiento del módulo entre 2005 y 2007, y apunta al 11,5 por ciento para 2010.

Cavernas presurizadas

El gran factor limitante de la energía solar es, desde luego, que se genera muy poca electricidad bajo cielos nubosos y ninguna por la noche. En las horas de sol debe, pues, producirse un exceso de energía que se almacenará para el consumo nocturno. La mayoría de los

JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*); KENN BROWN Y CHRIS WREN *Mondolithic Studios* (*ilustración*)



Plan de EE.UU. para 2050

La energía solar proporciona...

69 % de la electricidad | **35 %** de la energía total

Hacia 2050, serían los inmensos parques fotovoltaicos del sudoeste de Estados Unidos, en vez de las plantas de combustibles fósiles, los que abastecerían a esa nación de electricidad; además, aportarían energía para la adopción generalizada de vehículos eléctricos enchufables. La energía sobrante se almacenaría en forma de aire comprimido en cavernas subterráneas. También suministrarían electricidad grandes sistemas que concentrarían los rayos solares para calentar agua. Habría una nueva red básica de transmisión en alta tensión y corriente continua que transportaría la energía a los mercados regionales de la nación. A la derecha se resumen las diversas técnicas y los factores esenciales para su éxito, así como los progresos que han de alcanzar esas técnicas para 2050. El plan rebajaría sustancialmente el consumo nacional de combustibles fósiles y la emisión de gases de invernadero que lleva consigo (*abajo*). Se ha supuesto que la demanda neta de energía crece un 1 por ciento anual. Y hemos contado con las mejoras previstas hasta 2020 en técnicas solares, sin ningún perfeccionamiento posterior a esa fecha.

TECNICA

FOTOVOLTAICA

ACUMULACION DE ENERGIA POR AIRE A PRESION (con electricidad fotovoltaica)

ENERGIA SOLAR CONCENTRADA

TRANSMISION EN CC



CONSUMO ANUAL DE COMBUSTIBLE EN EE.UU.

	2007	2050 (fuentes de energía actuales)	2050 (gran proyecto solar)
CRUDO (Miles de millones de barriles)	6,9	10,9	2,7
GAS NATURAL (Billones de metros cúbicos)	22,2	35,4	11,4
CARBON (Miles de millones de toneladas)	1,2	1,9	0,5

EMISIONES EN EE.UU.

	2007	2050 (fuentes de energía actuales)	2050 (gran proyecto solar)
DIOXIDO DE CARBONO (Miles de millones de toneladas)	6,1	9,4	2,3

FACTOR ESENCIAL	2007	2050	PROGRESOS NECESARIOS
Superficie necesaria	26 km²	78.000 km²	Políticas de utilización de vastas zonas de terreno público
Rendimiento del módulo de película delgada	10 %	14 %	Materiales más transparentes que mejoren la transmisión de la luz; capas de dopaje más denso para aumentar la tensión; módulos mayores para reducir las zonas inactivas
Coste una vez instalado	4 dólares/W	1,20 dólares/W	Mejoras de rendimiento de los módulos; aumento de volúmenes de producción
Tarifa eléctrica	0,16 dólares/kWh	0,05 dólares/kWh	Resultado del descenso del coste de equipos e instalación
Capacidad total	0,5 GW	2940 GW	Plan nacional de energía concebido en torno a la energía solar
Volumen	0	15.000 millones m³	Política de emplazamientos coordinada con la industria del gas natural
Coste una vez instalado	5,80 dólares/W	3,90 dólares/W	Economías de escala; reducción de las tarifas de electricidad fotovoltaica
Tarifa eléctrica	0,20 dólares/kWh	0,09 dólares/kWh	Resultado del descenso del coste de equipos e instalación
Capacidad total	0,1 GW	558 GW	Plan nacional de energía
Superficie necesaria	26 km²	41.000 km²	Políticas de utilización de vastas zonas de terreno público
Rendimiento conversión energía solar a eléctrica	13 %	17 %	Fluidos que transfieran calor con mejor rendimiento
Coste una vez instalado	5,30 dólares/W	3,70 dólares/W	Sistemas de almacenamiento térmico de un solo depósito; economías de escala
Tarifa eléctrica	0,18 dólares/kWh	0,09 dólares/kWh	Resultado del descenso del coste de equipos e instalación
Capacidad total	0,5 GW	558 GW	Plan nacional de energía
Longitud	800 kilómetros	160.000-800.000 km	Nueva red de alta tensión en CC desde el sudoeste al resto del país



sistemas de acumulación, como las baterías, son caros o de escaso rendimiento.

Una solución prometedora consiste en acumular energía en forma de aire comprimido. La electricidad obtenida de plantas fotovoltaicas se usa para comprimir aire y bombearlo a cavernas vacías, minas abandonadas, acuíferos y pozos de gas natural agotados. Desde ahí, cuando se requiera, se libera aire a presión que hace girar una turbina generadora de electricidad con la ayuda de la combustión de gas natural en pequeñas cantidades. Estas plantas acumuladoras han funcionado de modo fiable en Huntorf (Alemania) desde 1978 y en McIntosh, Alabama, desde 1991. En esas turbinas se quema sólo el 40 por ciento de gas natural que se gastaría si fuera el único combustible; perfeccionando la recuperación del calor, la cifra descendería hasta el 30 por ciento.

Según los estudios del Instituto de Investigación de la Energía Eléctrica, en Palo Alto, California, el coste de almacenar energía por aire comprimido ronda hoy la mitad del asociado a las baterías de plomo-ácido. Ese almacenamiento añadiría de tres a cuatro centavos de dólar al coste del kWh de la energía fotovoltaica, lo que situaría en ocho o nueve centavos el coste total del kWh en el año 2020.

La electricidad producida en los parques fotovoltaicos del sudoeste se enviaría por líneas de corriente continua (CC) a alta tensión a instalaciones de acumulación presurizadas repartidas por todo el país. En ellas, las turbinas generarían electricidad durante todo el año. El quid está en encontrar lugares apropiados. Los trabajos cartográficos de la industria del gas natural y del mencionado Instituto de la Energía Eléctrica revelan que en el 75 por ciento del país existen formaciones geológicas adecuadas, a menudo próximas a las áreas metropolitanas. El sistema de acumulación energética por aire comprimido se asemejaría al utilizado para el gas natural en EE.UU., donde se almacena más de 200.000 millones de metros cúbicos de gas en 400 depósitos subterráneos. Hacia 2050, nuestro proyecto requeriría almacenar 15.000 millones de metros cúbicos con aire presurizado a 75 atmósferas. Aunque la construcción de esos depósitos sería todo un reto, disponemos de numerosos depósitos y tendría sentido que la industria del gas natural invirtiera en una red de ese tipo.

Sal caliente

Otra técnica que quizá suministraría la quinta parte de la energía solar a nuestro alcance es la concentración de radiaciones solares. Unos largos espejos metálicos, de forma cilindroparabólica, concentran los rayos solares en un tubo lleno de fluido y lo calientan como lo haría una enorme lente de aumento. Al atravesar un intercambiador de calor, el fluido caliente produce vapor que mueve una turbina.

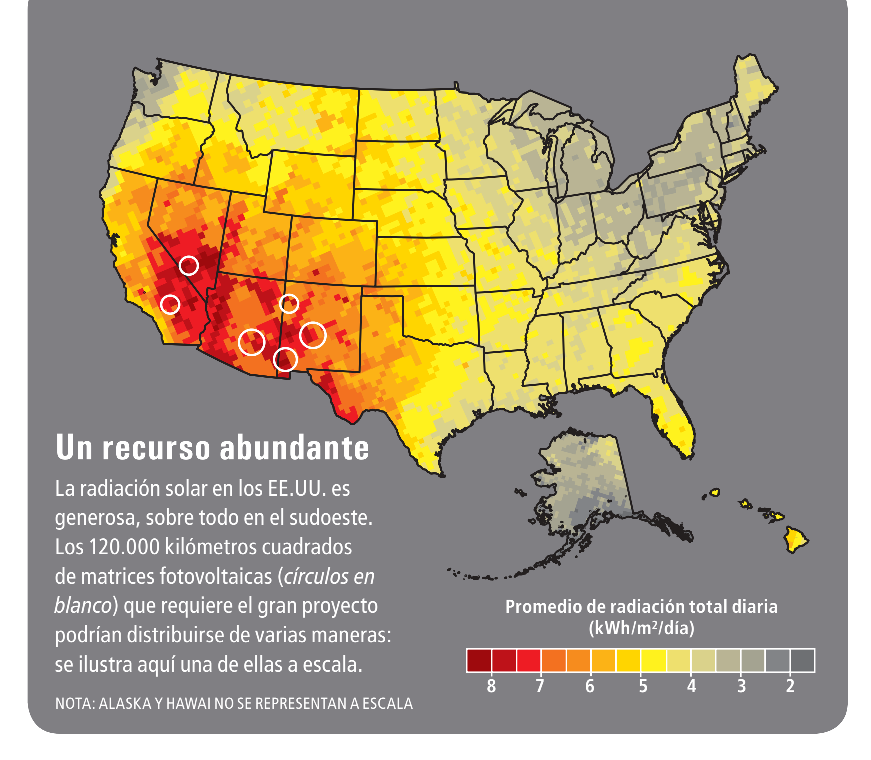
Con miras al almacenamiento, los tubos conducen a un gran depósito aislado, lleno de sal fundida, que retiene el calor con notable

TUCSON ELECTRIC POWER COMPANY



SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Según el plan de 2050, cerca de 80.000 kilómetros cuadrados de tierras estériles del sudoeste de Estados Unidos serían asiento de inmensos parques fotovoltaicos. Se parecerían a la planta de 4,6 megawatt de la compañía Tucson Electric Power en Springerville, Arizona, iniciada en 2000 (*izquierda*). En estas instalaciones, numerosas células fotovoltaicas interconectadas forman un módulo, y los módulos se cablean conjuntamente para constituir matrices (*derecha*). La corriente continua procedente de cada matriz pasa a un transformador, que la envía por líneas de alta tensión a la red eléctrica. En una célula de película delgada (*inserción*), la energía de los fotones incidentes libera electrones de la capa de telururo de cadmio y los hace cruzar una unión, pasar a la capa conductora anterior y de ahí a la capa conductora posterior, creando una corriente.



Un recurso abundante

La radiación solar en los EE.UU. es generosa, sobre todo en el sudoeste. Los 120.000 kilómetros cuadrados de matrices fotovoltaicas (*círculos en blanco*) que requiere el gran proyecto podrían distribuirse de varias maneras: se ilustra aquí una de ellas a escala.

NOTA: ALASKA Y HAWAI NO SE REPRESENTAN A ESCALA

eficacia. La extracción de calor se hace por la noche, mediante la creación de vapor. Pero la sal fundida se enfría poco a poco; por eso la energía almacenada se ha de extraer en el mismo día.

En EE.UU. hay nueve plantas solares de concentración, con una capacidad total de 354 megawatt (MW), que desde hace años producen electricidad de manera fiable. En marzo de 2007 entró en servicio una nueva planta de 64 MW en Nevada. Estas centrales, sin embargo, carecen de almacenamiento del calor. La primera instalación comercial que lo incorpora —una planta de 50 MW con siete horas de acumulación en sal fundida— se está construyendo en España (en Aldeire, Granada), y hay otras en fase de diseño por todo el mundo. Para nuestro proyecto se necesitarían 16 horas de acumulación con miras a una generación permanente de electricidad.

Las centrales en servicio demuestran la viabilidad de la energía termosolar de concentración, pero su coste ha de disminuir. Serán de gran ayuda las economías de escala y una investigación sin desmayo. En 2006 un informe del grupo de estudio convocado por la Asociación de Gobernadores del Oeste (de EE.UU.) sostenía que la concentración solar podría suministrar, hacia 2015, electricidad a no más de 10 centavos de dólar por kWh si se construían centrales que sumasen entre todas 4 GW. También mejoraría el rendimiento operativo si se hallaran medios para aumentar la temperatura de los fluidos que transmiten el calor. Se investiga, además, la utilización como termotransmisor de la propia sal fundida, lo cual reduciría las pérdidas térmicas y los costes. La sal, sin embargo, es corrosiva y habría que buscar conducciones que aguantasen más.

La concentración de radiaciones solares y la conversión fotovoltaica representan dos técnicas energéticas diferentes. Ni una ni otra han alcanzado pleno desarrollo. Por eso, proyectamos su implantación a gran escala hacia 2020, con tiempo para que hayan madurado. Asimismo, la evolución de técnicas solares en diversas combi-

PUNTOS A FAVOR

- Baja del 60 al 0 por ciento la dependencia del crudo importado
- Se suavizan las tensiones mundiales y los gastos militares descienden
- Se reduce notablemente el enorme déficit comercial
- Se llevan al mínimo las emisiones de gases de invernadero
- Aumentan los puestos de trabajo en el país

MAPA: CORTESIA DEL LABORATORIO NACIONAL DE ENERGIAS RENOVABLES; DON FOLEY (*ilustración*)

naciones podría satisfacer la demanda de manera económica. A medida que las instalaciones se extiendan, los ingenieros y economistas evalúan los pro y contra de esas técnicas; los inversores decidirán cuál de ellas apoyar.

Además, en corriente continua

Una red de energía solar no recuerda en nada el trazado actual de la red nacional de suministro eléctrico. Las plantas de carbón, petróleo, gas natural y energía nuclear que hoy salpican el paisaje se ubican en lugares no demasiado lejanos de los centros de la demanda. Pero la energía solar de EE.UU. se genera mayoritariamente en el sudoeste, y la red actual de transmisión en corriente alterna (CA) no tiene solidez suficiente para llevar la energía desde allí a los consumidores de cualquier lugar: las pérdidas en los tramos largos serían excesivas. Habría que construir una nueva red básica de transporte de energía en alta tensión y corriente continua (ATCC).

Los estudios del Laboratorio Nacional de Oak Ridge indican que las líneas ATCC de larga distancia pierden mucha menos energía que las líneas CA en tramos equivalentes. La nueva red básica radiaría desde el sudoeste hacia el resto de la nación. Las líneas terminarían en estaciones transformadoras, donde la energía se convertiría a CA y pasaría a las líneas regionales que abastecen a los consumidores.

El sistema de corriente alterna en EE.UU. está sobrecargado, lo que ocasiona señaladas carencias en California y otras regiones. Las líneas CC son menos costosas y requieren menos terreno que las líneas CA equivalentes. En EE.UU. funcionan hoy alrededor de 800 kilómetros de líneas ATCC, que han demostrado fiabilidad y eficiencia. No parecen necesarios grandes avances técnicos, pero una mayor experiencia ayudaría a perfeccionar la explotación. El Consorcio de la Energía del Sudoeste, de Texas, está diseñando un sistema integrado de transmisión en CC y CA que permitirá desarrollar una red de energía eólica de 10 GW en el oeste de Texas. Y TransCanada propone instalar 3500 kilómetros de líneas ATCC para el transporte de energía eólica desde Montana y el sur de Wyoming hasta más allá de Las Vegas.

Etapa uno: desde hoy hasta 2020

Hemos reflexionado bastante sobre la realización de este gran proyecto solar. Prevemos dos etapas distintas. En la primera, desde ahora hasta 2020, la energía solar deberá hacerse competitiva en producción masiva. En esta etapa será necesario que el gobierno garantice créditos a 30 años, se comprometa a comprar energía y otorgue subvenciones que sostengan los precios. El monto anual de las ayudas subirá continuamente desde 2011 hasta 2020. A partir de ese momento, los sistemas de energía solar competirán por sus propios méritos. El total de las subvenciones ascenderá a 420.000 millones de dólares, que podrán costearse como más adelante se explica.

Hacia 2020, las centrales fotovoltaicas y de concentración solar construidas darían una energía de unos 84 GW. En paralelo, se habría instalado una red de transmisión en corriente continua, siguiendo los actuales corredores con derecho de paso que flanquean las autopistas interestatales; esto reduciría al mínimo las barreras por expropiación de terrenos y distintas regulaciones. La estructura de base llegaría a los grandes mercados de Phoenix, Las Vegas, Los Angeles y San Diego por el oeste, y de San Antonio, Dallas, Houston, Nueva Orleans, Birmingham (Alabama), Tampa (Florida) y Atlanta por el este.

En cada uno de los cinco primeros años se instalarían plantas que en total generarían 1,5 GW de energía fotovoltaica y 1,5 GW de termosolar concentrada: ello incitaría a muchos fabricantes a elevar su producción. En los cinco años siguientes, el ritmo de construcción crecería hasta 5 GW por año, lo que ayudaría a optimizar las líneas de producción de las empresas. Como resultado, la electricidad solar caería hacia los seis centavos de dólar por kWh. Se trata de un plan de ejecución realista: en cada año entre 1972 y 1987 se instalaron

PUNTOS EN CONTRA

- El monto de las subvenciones hasta 2050 rayará en 420.000 millones de dólares
- Se necesita una dirección política para establecer las subvenciones, posiblemente con un gravamen sobre el carbono
- Las compañías eléctricas privadas han de construir sistemas rentables de transmisión eléctrica por líneas de alta tensión en corriente continua

POWERSOUTH ENERGY COOPERATIVE



en EE.UU. centrales nucleares cuya energía total superaba los 5 GW. Y no sólo eso; los sistemas de energía solar se pueden fabricar e instalar con mucha más rapidez que las plantas de energía ordinarias, gracias a su diseño simple y a la relativa ausencia de complicaciones ambientales y de seguridad.

Etapa dos: 2020 a 2050

Es primordial que los grandes incentivos de mercado se mantengan más allá de 2020, a fin de que más tarde pueda mantenerse el crecimiento por sí mismo. En nuestra extensión del modelo hasta 2050 hemos adoptado una posición conservadora: no contamos con ningún avance técnico, ni mejora de costes posterior a 2020. Además, suponemos que la demanda de energía nacional crecerá el 1 por ciento anual.

En tal situación, las plantas de energía solar suministrarán, allá por 2050, un 69 por ciento de la electricidad de EE.UU. y un 35 por ciento de la energía total consumida en el país. En esa cantidad se incluye el suministro de toda la electricidad consumida por 344 millones de vehículos híbridos recargables, que sustituirían a sus homólogos de gasolina: un paso esencial para reducir la dependencia del crudo importado y mitigar las emisiones de gases de invernadero. Se crearían en torno a tres millones de empleos nacionales —sobre todo en la fabricación de componentes para plantas solares—, número varias veces superior al de puestos de trabajo que se perderían por el declive de las industrias de combustibles fósiles.

La drástica reducción del crudo importado disminuiría en unos 300.000 millones de dólares por año los pagos de la balanza comercial, en el supuesto de que el precio del petróleo se mantuviera en 60 dólares por barril (precio inferior a los precios medios en 2007). Una vez instaladas, las plantas de energía solar necesitan mantenimiento y reparaciones, pero la luz solar es eternamente gratuita, lo que duplica año tras año los ahorros conseguidos en combustible. Además, la inversión en técnicas solares reforzaría la seguridad energética nacional, reduciría los gastos de las fuerzas armadas y disminuiría enormemente los costes sociales de la contaminación y el calentamiento global, se trate de los problemas para la salud humana o de la degradación de costas y terrenos de cultivo.

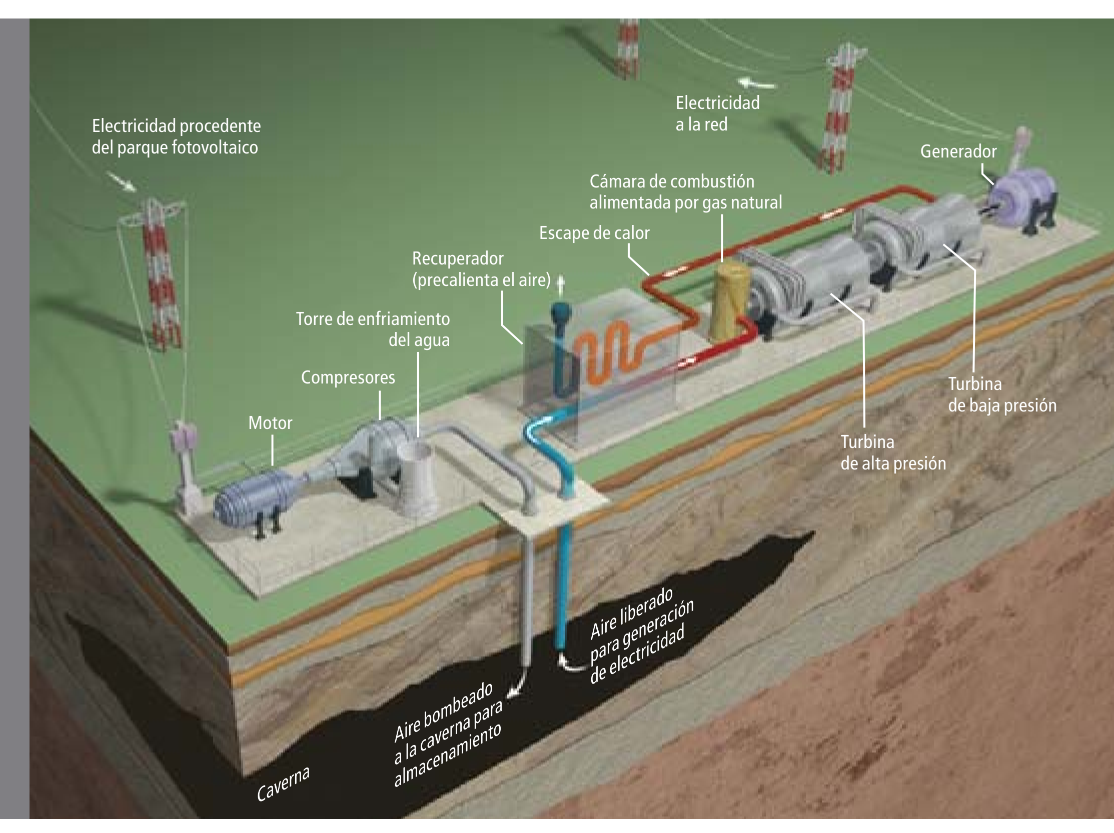
Es curioso que este gran proyecto solar haga disminuir el consumo de energía. Aun contando con el crecimiento anual del uno por ciento en la demanda, los 100 trillones de joule consumidos en 2006 *caerían* a 93 trillones hacia 2050. La razón estribaría en que en la extracción y procesado de los combustibles fósiles se consume gran cantidad de energía; se desperdicia todavía más en su combustión y el control de sus emisiones.

Para alcanzar los objetivos de 2050, se necesitarían 120.000 kilómetros cuadrados de terrenos para instalaciones fotovoltaicas y de concentración solar. Es una superficie enorme,

DON FOLEY

ALMACENAMIENTO SUBTERRANEO

La electricidad sobrante producida en horas diurnas en los parques fotovoltaicos se transportaría por líneas eléctricas a acumuladores de energía en aire comprimido próximos a las ciudades. Desde esos lugares se abastecería por la noche a los consumidores de energía. La técnica está ya disponible; la planta de PowerSouth Energy Cooperative en McIntosh, Alabama (*izquierda*) funciona desde 1991 (el tubo blanco succiona aire hacia el subsuelo). En estos diseños, la electricidad que llega mueve motores y compresores, que presurizan el aire y lo envían a cavernas, minas o acuíferos desocupados (*derecha*). El aire que se libera es calentado por la combustión de pequeñas cantidades de gas natural; los gases calientes se expanden y hacen girar turbinas, generadoras de electricidad.



Los autores

Ken Zweibel, James Mason y **Vasilis Fthenakis** se encontraron hace diez años cuando estudiaban el ciclo vital de productos fotovoltaicos. Zweibel, presidente de PrimeStar Solar en Golden, ha dirigido durante 15 años la Asociación Fotovoltaica de Película Delgada del Laboratorio Nacional de Energía Renovable. Mason gestiona la Campaña de Energía Solar y del Instituto de Investigación del Hidrógeno en Farmingdale, Nueva York. Fthenakis es jefe del Centro Fotovoltaico de Investigación Ambiental en el Laboratorio Nacional de Brookhaven, además de profesor y director del Centro de Análisis del Ciclo Vital en la Universidad de Columbia.

pero sólo un 19 por ciento de la disponible para estos fines en el sudoeste; por otra parte, es casi toda estéril y no tiene valor competitivo. Hemos supuesto que sólo el 10 por ciento de la capacidad solar en 2050 provendrá de instalaciones fotovoltaicas distribuidas, es decir, las situadas en azoteas y parcelas. Mas, en cuanto desciendan los precios, estas aplicaciones podrían desempeñar un papel destacado.

Allende 2050

Aunque sea imposible prever con certeza alguna lo que va a ocurrir a más de 50 años vista, hemos elaborado un panorama del 2100 que nos permita apreciar el potencial de la energía solar. Imaginamos que, para aquel entonces, la demanda de energía total (incluido el transporte) alcanzará la cifra de 140 trillones de joule, con siete veces la capacidad generadora de electricidad actual.

Una vez más desde un enfoque conservador, estimamos cuál sería la capacidad total de plantas solares necesaria en el caso más desfavorable en cuanto a insolación en el sudoeste. Según los registros de la Base de Datos Nacional de Radiaciones Solares de 1961 a 2005, es el que se dio en el invierno de 1982-1983 y en 1993 tras la erupción del monte Pinatubo. Y tampoco hemos contado con avances técnicos ni económicos posteriores a 2020, aun cuando es casi seguro que en 80 años la investigación en curso mejorará rendimientos, costes y sistemas de acumulación.

Partiendo de tales supuestos, la demanda estadounidense de energía podría atenderse con las siguientes capacidades: 2,9 terawatt (TW) de energía fotovoltaica entregados directamente a la red y otros 7,5 TW dedicados a la acumulación en aire comprimido; 2,3 TW de plantas de energía solar concentrada; y 1,3 TW de instalaciones fotovoltaicas distribuidas. El suministro se redondearía con 1 TW de parques eólicos, 0,2 TW de plantas geotérmicas y 0,25 TW producidos por biomasa para combustibles. El modelo incluye 0,5 TW de bombas de calor geotérmicas para calefacción y refrigeración directa de edificios. Los sistemas solares exigirían más de 400.000 kilómetros cuadrados de terreno: seguiría siendo menos que la superficie adecuada disponible en el sudoeste.

En 2100, este parque de energías renovables podría generar el 100 por ciento de toda la electricidad de EE.UU. y más del 90 por ciento de la energía total consumida en el país. En primavera y verano, la infraestructura solar produciría suficiente hidrógeno para atender más del 90 por ciento de toda la demanda de combustible para el transporte, y sustituiría a las pequeñas aportaciones de gas natural utilizadas para ayudar a las turbinas de aire comprimido. Añadiendo unos 180.000 millones de litros de biocombustible se cubriría el resto de la energía consumida en transporte. Las emisiones de dióxido de carbono relacionadas con la energía se reducirían un 92 por ciento con respecto a los niveles de 2005.

¿Quién lo paga?

Nuestro modelo no es un plan de austeridad, puesto que supone un aumento del 1 por ciento anual en la demanda, que mantendría estilos de vida semejantes a los actuales, con presumibles mejoras de eficacia en la generación y el uso de la energía. Quizás el gran

CORTESIA DE NREL



CONCENTRACION SOLAR

Las grandes plantas de energía solar concentrada complementarían a los parques fotovoltaicos del sudoeste de Estados Unidos. La planta Kramer Junction, en el desierto de Mojave (*izquierda*), funciona desde 1989 con técnica importada de Solel, de Beit Shemesh, Israel. Unos espejos cilindro-parabólicos metálicos concentran los rayos solares en una conducción, calentando un líquido en su interior, por ejemplo glicol de etileno (*derecha*). Los espejos giran para seguir la orientación del Sol. Las conducciones calientes recorren un segundo lazo dentro de un intercambiador de calor que contiene agua, y vaporizan esa agua para hacer girar una turbina. Las plantas del futuro podrían, además, enviar el fluido caliente a través de un depósito que retiene sal fundida. Esta sal almacenaría calor que por la noche podría extraer el intercambiador de calor.

interrogante sea cómo pagar una renovación de la infraestructura energética nacional por valor de 420.000 millones de dólares. Una idea muy extendida consiste en gravar las emisiones de carbono. La Agencia Internacional de la Energía sugiere que habría que gravar con un impuesto de entre 40 y 90 dólares cada tonelada de carbón para inducir a las compañías eléctricas a establecer sistemas de captura y almacenamiento que reduzcan las emisiones de dióxido de carbono. Este impuesto equivale a elevar el precio del kWh en uno o dos centavos de dólar. Pero nuestro plan no es tan oneroso. Los 420.000 citados podrían conseguirse aplicando un impuesto sobre el carbono de 0,5 centavos por kWh. Y dado que la electricidad en EE.UU. cuesta hoy de 6 a 10 centavos por kWh, parece razonable aumentar esas tarifas en 0,5 centavos.

El Congreso podría establecer incentivos financieros mediante la promulgación de un plan nacional de energías renovables. Consideremos el programa estadounidense de apoyo a los precios agrarios, que se ha justificado por razones de seguridad nacional. Un programa semejante para los precios de la energía solar aseguraría el futuro energético nacional, esencial para el bienestar del país a largo plazo. Las subvenciones se irían otorgando gradualmente desde 2011 a 2020; con un plazo de amortización normal de 30 años, terminarían de 2041 a 2050. Las compañías eléctricas de ATCC no necesitarían subvención, puesto que la construcción de líneas y estaciones transformadoras se financiaría, como ahora sucede con las líneas de CA, con los beneficios obtenidos del suministro eléctrico.

Bibliografía complementaria

THE TERAWATT CHALLENGE FOR THIN FILM PHOTOVOLTAIC. Ken Zweibel en *Thin Film Solar Cells: Fabrication, Characterization and Applications*. Preparado por Jef Poortmans y Vladimir Arkhipov. John Wiley & Sons, 2006.

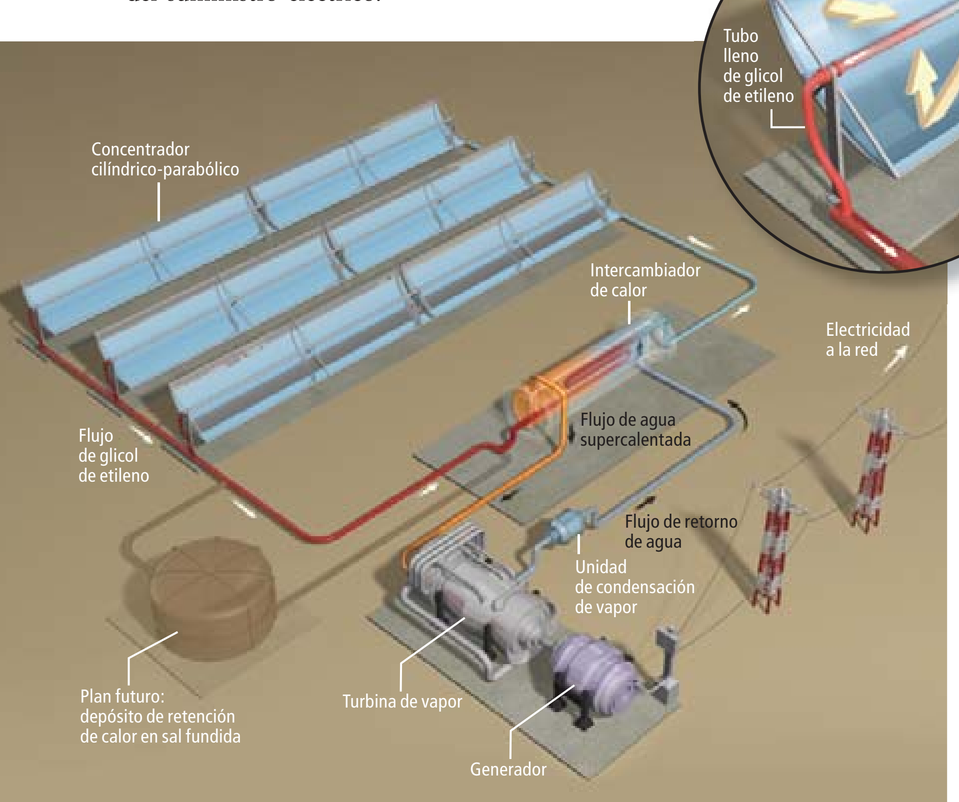
ENERGY AUTONOMY: THE ECONOMIC, SOCIAL AND TECHNOLOGICAL CASE FOR RENEWABLE ENERGY. Hermann Scheer. Earthscan Publications, 2007.

Aunque 420.000 millones sean mucho dinero, el gasto anual no alcanzaría el del citado programa de precios agrarios. También es inferior a los impuestos recaudados para subvencionar la construcción de la red nacional de telecomunicaciones de alta velocidad durante los últimos 35 años. Por no mencionar que independiza a EE.UU. de las repercusiones políticas y presupuestarias de los conflictos internacionales que afecten a la energía.

Sin subvenciones, un gran proyecto solar resultaría imposible. Otros países han llegado a conclusiones semejantes: en Japón ya se construye una vasta infraestructura solar subvencionada. Alemania ha acometido un programa de ámbito nacional. Aunque las inversiones sean cuantiosas, no debe olvidarse que la fuente de energía, la luz solar, es gratuita. No cabe hablar de costes anuales de combustible o de control de la contaminación como en el carbón, el petróleo o la energía nuclear; sólo costaría algo el gas natural en los sistemas de aire comprimido, aunque también eso se ahorraría utilizando hidrógeno o biocombustibles. Cuando se contabilizan las economías de combustible, la energía solar sería en decenios venideros una ganga. Pero no podemos esperar hasta entonces para emprender nuestro desarrollo.

No han faltado dudas y temores. Por ejemplo: que la carencia de materiales entorpezca las instalaciones a gran escala. Si el programa es rápido, pueden darse situaciones de escasez transitorias. Pero hay células de varios tipos y diferentes combinaciones de materiales. Podemos también reducir la cantidad de material requerido si depuramos el proceso y el reciclaje. A largo plazo, las células solares envejecidas podrán reciclarse en células solares nuevas: el abastecimiento energético ya no se basará en combustibles perecederos, sino en materiales reciclables.

Con todo, el mayor obstáculo para implantar un sistema de energía renovable en los EE.UU. no estriba en la técnica, ni en el dinero, sino en la población, que no se ha percatado de que la energía solar constituye una solución factible, útil como agente propulsor del transporte. Quienes tengan visión de futuro deberían persuadir a los ciudadanos, y a sus líderes políticos y científicos, del asombroso potencial de la energía solar. Una vez convencidos, creemos que el deseo de independencia energética y la necesidad de reducir las emisiones de dióxido de carbono urgirán la adopción de un plan nacional de energía solar.





Fluoración, de nuevo a examen

El flúor ha demostrado su eficacia preventiva de la caries. Sin embargo, cuando se administra en exceso puede aumentar el riesgo de alteraciones dentales, óseas, cerebrales y metabólicas

Dan Fagin

CONCEPTOS BASICOS

- Los efectos del flúor, que en la mayoría de las localidades estadounidenses se añade al agua potable, se están escrutando con mayor atención. En exceso, puede aumentar el riesgo de alteraciones dentales, óseas, cerebrales y metabólicas.
- El Consejo Nacional de Investigación estadounidense recomendó, en un informe de 2006, que el gobierno federal rebajase el límite actual fijado para la concentración de ion fluoruro en el agua potable, cuyo exceso entrañaría riesgos para la salud.

Antes de los apasionados debates sobre el tabaquismo, el DDT, el amianto o el agujero de la capa de ozono, la cuestión ambiental y de salud pública que preocupaba a los estadounidenses era la fluoración. En la segunda mitad de siglo pasado, centenares de poblaciones repartidas por todos los estados de la Unión vivieron enconadas batallas sobre la conveniencia de añadir fluoruros —compuestos que contienen iones de flúor— a la red de suministro de agua. Uno de los bandos cerraba una amplia coalición de científicos (de todos los sectores, público y privado) que propugnaban que la adición de fluoruros al agua potable contribuiría a prevenir la formación de caries dentarias. En el bando contrario, otros activistas criticaban la ausencia de estudios científicos sobre los riesgos de la fluoración; consideraban que tal práctica equivalía a una medicación obligatoria y que constituía, en consecuencia, un atentado contra las libertades civiles.

Los defensores de la fluoración consiguieron llevarse el agua —fluorada— a su molino, en parte, mediante la ridiculización de organizaciones de ultraderecha (la sociedad John Birch, por ejemplo) que sostenían que la fluoración no era más que un complot comunista para intoxicar a los norteamericanos. En la actualidad, alrededor del 60 por ciento de la población de EE.UU. (46 de las 50 ciudades principales) bebe de su grifo agua fluorada. La fluoración se ha introducido también en Canadá, Reino Unido, Australia y Nueva Zelanda. En todos esos países, lo mismo que en EE.UU., quienes han criticado tal medida han sido tratados con desdén por los investigadores y los organismos oficiales, que los han tildado de chiflados o de retrógrados fundamentalistas. (En otros países, en cambio, la fluoración del agua es escasa y controvertida.) Los Centros estadounidenses de Control y Prevención de Enfermedades consideran la fluoración del agua uno de los diez grandes logros sanitarios del siglo XX, parejamente con las vacunas y el control de la natalidad.

Ahora, sin embargo, la opinión de los científicos sobre la fluoración puede estar tomando nuevos rumbos en el país que fue pionero en su aplicación. Una comisión del Consejo Nacional de Investigación (NCR), tras más de dos años de análisis y revisión de centenares de estudios, emitió en 2006 un informe que concedía una pincelada de legitimidad a algunas de las tesis sostenidas desde antiguo por los oponentes a la fluoración. El informe concluía que el límite máximo establecido por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) para la concentración de ion fluoruro en el agua potable, que es de 4 mg/L, debería re-

bajarse, pues entraña riesgos para la salud de niños y adultos. En los niños, la exposición sistemática a tales concentraciones de fluoruro provoca la decoloración y deformación de los dientes permanentes que empiezan a salir, un mal que se denomina fluorosis dental. En los adultos, esa misma concentración de ion fluoruro parece incrementar el riesgo de fracturas óseas y, posiblemente, de fluorosis esquelética moderada, un anquilosamiento doloroso de las articulaciones.

La concentración de fluoruros en el agua potable de EE.UU. es inferior al límite establecido por la EPA. El problema estriba en que el agua del grifo no es la única fuente de fluoruros: los ingerimos también a través de alimentos, bebidas y productos de higiene dental. La comisión del NCR hizo notar que los fluoruros pueden desencadenar trastornos de mayor gravedad: cánceres óseos y alteraciones cerebrales y tiroideas. Tales efectos no se han demostrado todavía, pero la comisión considera que merecen ser estudiados con detenimiento.

La investigación de mayor alcance y duración que se ha realizado sobre los efectos del



BUENO, PERO CON MODERACION. El ion fluoruro se encuentra en numerosos alimentos, bebidas y productos de higiene dental. Tal ubicuidad puede resultar en una sobredosis de anticaries, sobre todo en niños.

UTILIZACION DEL FLUOR EN ESPAÑA

En España beben agua potable fluorada algo más de cuatro millones de habitantes. La fluorización de las aguas de suministro público se inició en los años ochenta del siglo pasado, fruto del primer estudio epidemiológico de salud oral llevado a cabo bajo la tutela de la Organización Mundial de la Salud (OMS), en 1983. Andalucía (1985) fue la primera comunidad autónoma en legislar la fluoración de aguas potables de consumo público; le siguieron el País Vasco (1988), Extremadura (1989), Galicia (1990) y Murcia (1990). En esas comunidades se estableció la obligatoriedad de la fluoración para las empresas o entidades proveedoras y distribuidoras de agua de consumo que abastecieran a poblaciones de entre 25.000 y 30.000 habitantes, cuyas aguas presentaran concentraciones del ion fluoruro inferiores a 0,7 ppm (partes por millón) y cuya salud dental no alcanzara los niveles recomendados por la OMS. En ningún caso la concentración final de flúor debía sobrepasar los 1,2 ppm.

La puesta en marcha de las plantas de fluoración fue bien acogida, sobre todo en el País Vasco, donde la incorporación del flúor en el agua de bebida de los tres grandes núcleos de población provocó un descenso notable del índice de caries. Al final del decenio de los noventa, se observó una clara reducción de la caries, sobre todo en niños: se alcanzaron precozmente los objetivos de salud oral que la OMS había fijado para el año 2000.

La caries dental presenta actualmente en España una prevalencia baja. El seguimiento de la evolución de los índices de caries en la población infantil y adulta se realiza mediante estudios epidemiológicos periódicos de ámbito nacional (cada seis años), además de algunos de ámbito autonómico, casi todos ellos supervisados por la Sociedad Española de Epidemiología y Salud Pública Oral. Los resultados indican que el índice de caries disminuye en cuanto a los valores medios obtenidos para toda la población, pero se acumula en determinados grupos desfavorecidos y con bajos niveles socioeconómicos, como es el caso de la población inmigrante.

El cepillado dental diario con dentífricos que contienen flúor, junto con la mejora en las condiciones higiénicas y dietéticas de la población en los últimos veinte años aparecen como la causa principal del descenso de la caries en nuestro país. De ahí que no se hayan promovido nuevos proyectos de fluorización de los abastecimientos públicos de agua potable.

Las plantas de fluorización instaladas entre los años ochenta y noventa siguen operativas, sin que se haya cuestionado su utilidad, ni hayan presentado ningún tipo de controversia en su funcionamiento. Los índices de fluorosis dental registrados en los estudios epidemiológicos nacionales y regionales no han demostrado ninguna alteración relevante en las poblaciones que beben agua fluorada.



Más de cuatro millones de españoles beben agua potable fluorada.

Los resultados de las encuestas indican que más del 75 por ciento de los escolares españoles se cepillan los dientes, al menos una vez al día, con un dentífrico fluorado; más del 90 por ciento conoce el efecto preventivo del flúor sobre el desarrollo de la caries dental. La utilización de enjuagues de flúor en la escuela constituye una actividad integrada en los programas de salud oral infantil de casi la totalidad de las comunidades autónomas. La utilización de tabletas de flúor, en cambio, se ha ido reduciendo. En algunos supermercados puede encontrarse sal fluorada, pero su uso no es mayoritario; además, no se han apreciado casos de fluorosis dental atribuibles al consumo de la misma. Tampoco se han llevado a cabo programas de fluorización de la leche.

En resumen, la utilización del flúor en la población española se realiza, en su mayor parte, mediante preparados dentales de aplicación tópica (dentífricos y enjuagues) que han demostrado, fuera de toda duda, su efectividad en la reducción de la caries y su inocuidad para la salud oral y general de los individuos.

José Manuel Almerich Silla
Dpto. Estomatología
Universidad de Valencia

ion fluoruro es el Estudio del Fluoruro de Iowa, dirigido por Steven M. Levy, de la facultad de odontología de la Universidad de Iowa. Se ha seguido de cerca a unos 700 niños de ese estado, con el objetivo de elucidar efectos de la fluoración que pudieran haberse omitido en estudios anteriores. Al propio tiempo, Levy encabeza uno de los proyectos más completos de medición de la concentración de fluoruros en millares de productos (alimentos, bebidas y dentífricos), con el propósito de determinar la ingesta típica de fluoruros.

Este campo de investigación entraña una complejidad enloquecedora. Las dietas, los hábitos de higiene oral y el grado de fluoración presentan en la población una enorme variabilidad. Además, el grado de exposición a los efectos (positivos y negativos) del flúor depende también de factores genéticos, ambientales y culturales. A pesar de todas las incertidumbres, Levy y otros expertos consideran probable que algunos niños, sobre todo los de muy corta edad, estén recibiendo una sobredosis de fluoruros.

La mayoría de esos científicos, Levy incluido, siguen respaldando la fluoración del agua como un buen método preventivo de la caries, especialmente en poblaciones de escasa higiene dental. Pero opinan también que en las comunidades donde se practica una higie-

ne dental adecuada, las pruebas a favor de la fluoración han perdido solidez. Según Levy, en lugar de seguir insistiendo en la fluoración, lo que debería hacerse es hallar el punto de equilibrio.

El advenimiento de la fluoración

En el despacho de Levy penden, enmarcados, anuncios de dentífricos de hace más de medio siglo. Uno de ellos, que elogia las virtudes de la pasta Pebeco, proclama: "¿Acaso quiere unos dientes viejos y feos?". Otro asegura que "La pasta dentífrica Colgate Clorofilada acaba con el mal aliento". Se trata de artefactos de la era pre-fluorídica, cuando las caries eran un mal general y la publicidad de los dentífricos se basaba en afirmaciones médicamente cuestionables.

Las campañas de fluoración cambiaron el panorama. La primera ciudad en fluorar su red de agua fue Grand Rapids, en 1945. Diez años después, Procter & Gamble comercializaba Crest, el primer dentífrico con flúor, que contenía fluoruro estannoso (un átomo de estaño y dos de flúor). En 1967, Colgate-Palmolive modificó la fórmula del Colgate con el que se convertiría en el principal ingrediente anticaries de los dentífricos: el monofluorofosfato de sodio. Sin embargo, la mayoría de las redes de agua potable, en lugar de seguir utilizando las sales de flúor de los dentífricos, que son las que recomiendan los odontólogos, han optado por un sistema más barato: la fluoración mediante silico-fluoruros como el ácido hexafluorosilícico, un subproducto de la fabricación de abonos químicos, en la que se tratan las menas de fosfato con ácido sulfúrico.

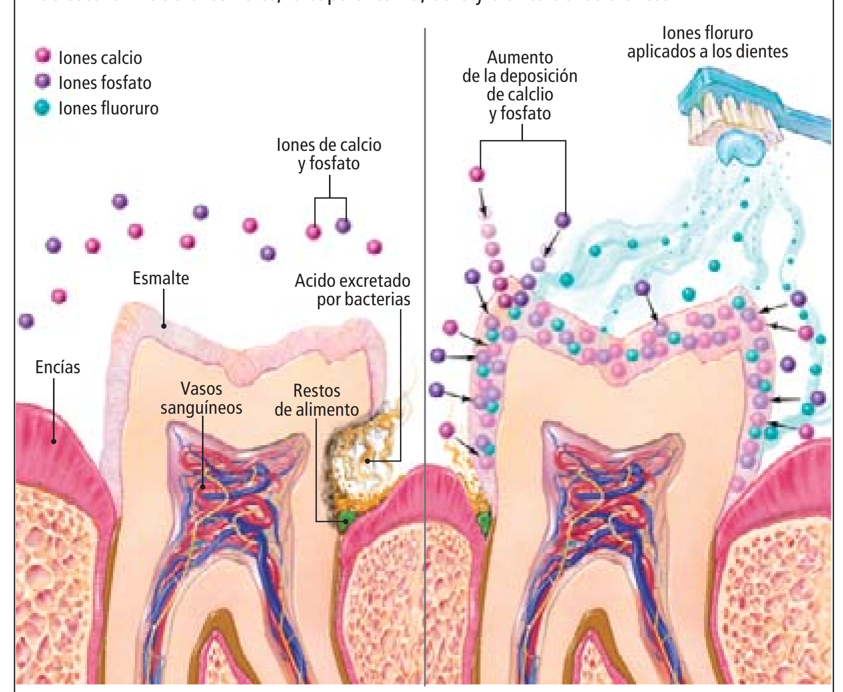
Durante los años setenta y ochenta del siglo pasado, los EE.UU. se vieron inundados por diversas formas de fluoración, que se convirtió en la piedra angular de la odontología preventiva en la mayoría de los países de habla inglesa. Aunque la cuantificación exacta de la reducción en la incidencia de caries y de las causas de tal descenso en ese período son objeto de un acalorado debate, los odontólogos coinciden en que tal reducción fue notable y que ha de acreditarse a la fluoración gran parte del mérito.

Tal era la situación cuando Levy inició su actividad en salud dental pública hace veintitantos años. Colgate-Palmolive financió sus primeras investigaciones, cuyos resultados provocaron un aumento del empleo de fluoruro en las clínicas dentales. Pero conforme los dentistas estadounidenses fueron observando una reducción de las caries y un aumento de las fluorosis en los pacientes jóvenes, Levy empezó a preguntarse si los niños no estarían

ANDREW SWIFT (*dientes*); LUCY READING-IKKANDA (*gráfica*)

PREVENCION DE CARIES

La función del ion fluoruro en la prevención de la caries se debe a la poderosa atracción de este ion hacia el esmalte, la capa externa, dura y blanca de los dientes.



▲ Sin fluoruros

El principal componente mineral del esmalte es la hidroxilapatita, un cristal compuesto por calcio, fósforo, hidrógeno y oxígeno. Las bacterias consumen los azúcares de los residuos de alimentos incrustados en los intersticios dentales; excretan luego ácido láctico, que rebaja lo suficiente el *p*H de la boca como para disolver la hidroxilapatita. Si la velocidad de corrosión es mayor que la tasa de remineralización (deposición de iones calcio y fosfato de la saliva sobre el esmalte) se forman cavidades (caries) en los dientes.

▲ Con fluoruros

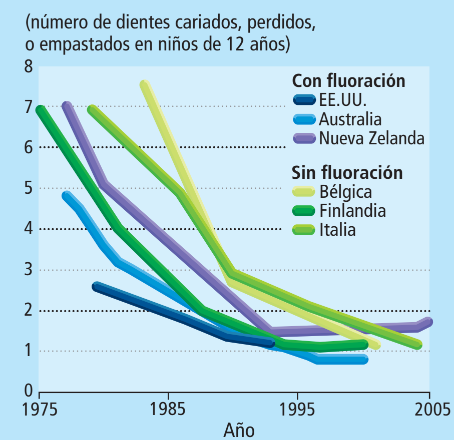
La aplicación tópica de fluoruro a los dientes posee dos efectos. En primer lugar, los iones de flúor reemplazan algunos grupos hidroxilo en las moléculas de hidroxilapatita; ello crea cristales de fluoroapatita, que son algo más resistentes a los ácidos corrosivos que excretan las bacterias. En segundo lugar, los fluoruros de la superficie de los dientes catalizan la deposición de calcio y fosfato, con lo que remineralizan el diente y lo defienden de la formación de caries.

Debate sobre los efectos

Los Centros de Control y Prevención de Enfermedades de EE.UU. han elogiado la fluoración, que numeran entre los 10 principales avances sanitarios del siglo XX. Proclaman que la adición del fluoruro al agua potable ha sido una de las causas determinantes de la disminución de la degradación dentaria (número de dientes cariados, extraídos, o empastados en niños de 12 años de edad) que se ha registrado en los últimos treinta años. Sin embargo, las tasas de degradación han disminuido de forma notable también en muchos países cuya red pública de agua no se ha fluorado. En algunos de esos países, los fluoruros que se añaden a los alimentos, las bebidas y los productos de higiene dental podrían explicar, en parte, tal declive.

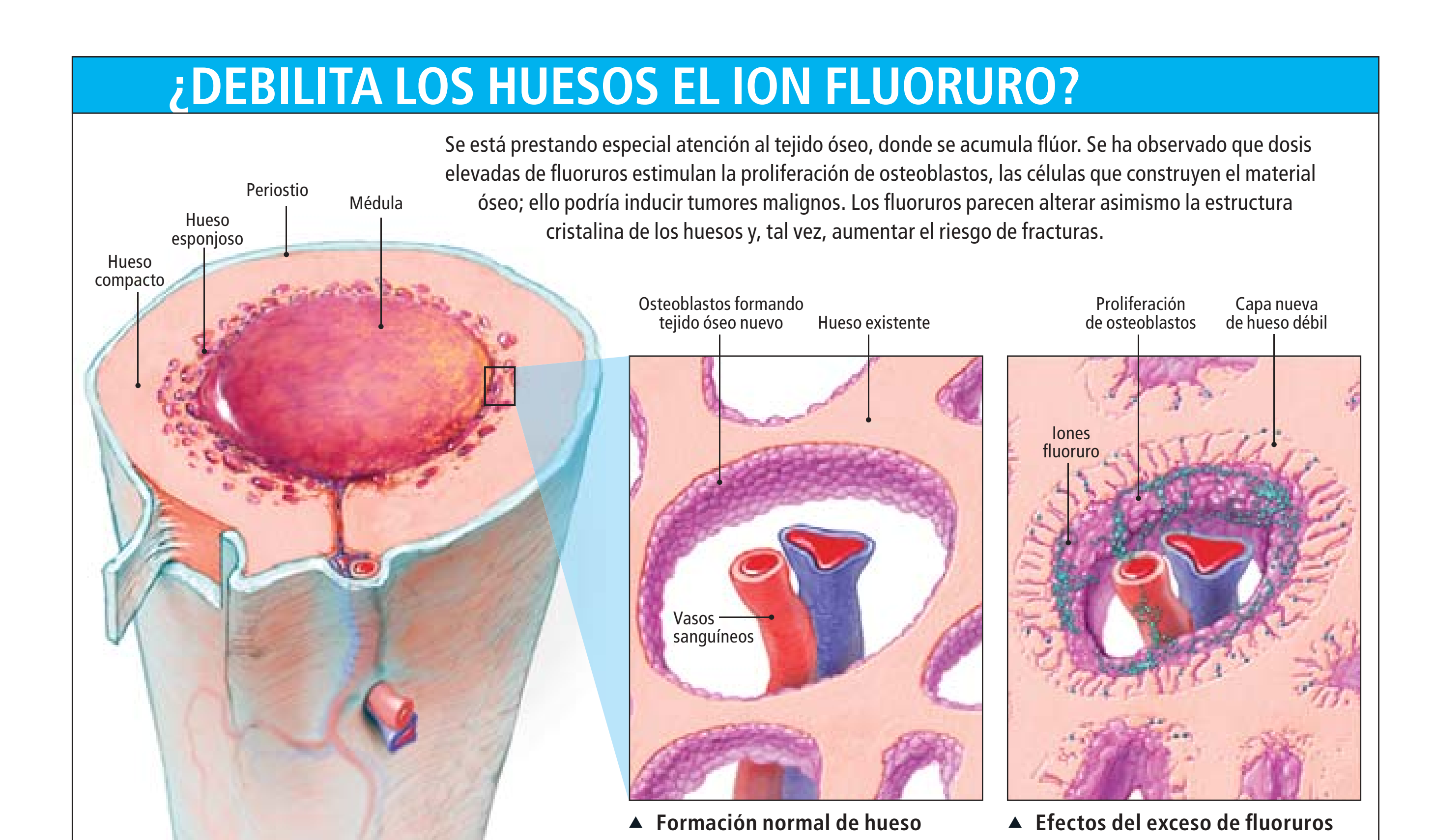
INDICE DE DEGRADACION DENTAL

(número de dientes cariados, perdidos, o empastados en niños de 12 años)



¿DEBILITA LOS HUESOS EL ION FLUORURO?

Se está prestando especial atención al tejido óseo, donde se acumula flúor. Se ha observado que dosis elevadas de fluoruros estimulan la proliferación de osteoblastos, las células que construyen el material óseo; ello podría inducir tumores malignos. Los fluoruros parecen alterar asimismo la estructura cristalina de los huesos y, tal vez, aumentar el riesgo de fracturas.



▲ **Formación normal de hueso**

▲ **Efectos del exceso de fluoruros**

El autor

Dan Fagin es profesor de periodismo y director del Programa de Noticias sobre Ciencia, Salud y Ambiente de la Universidad de Nueva York. En 2003 recibió el premio de la Asociación Americana para el Progreso de la Ciencia (AAAS) de periodismo científico por sus artículos sobre epidemiología del cáncer.

recibiendo una sobredosis. Empezó a dudar de los beneficios de los fluoruros. ¿En qué punto acababa el efecto preventivo de la caries y empezaba la fluorosis?

Ese doble papel de los fluoruros, que evitan una enfermedad pero son causa de otra, tiene su raíz en la poderosa acción de los iones sobre los tejidos ricos en calcio. De hecho, más del 99 por ciento de los fluoruros ingeridos que no se eliminan de inmediato inhibe la aparición de caries por dos vías. En primer lugar, el fluoruro que entra en contacto con el esmalte dental (la capa superficial, blanca y dura, que recubre los dientes) se incrusta en las estructuras cristalinas de hidroxilapatita, el principal componente mineral de los dientes y los huesos. Los iones de flúor reemplazan a una parte de los grupos hidroxílicos de las moléculas de hidroxilapatita del esmalte; esta sustitución aumenta la resistencia de los dientes al ácido que las bacterias de la boca excretan al metabolizar los restos de alimentos, ácido que ataca el esmalte.

En segundo lugar, el flúor incrustado en la superficie dental cataliza la deposición de calcio y fosfatos, lo que facilita la reconstrucción de los cristales de esmalte que las bacterias disuelven.

Pero cuando se ingiere en dosis excesivas, el ion fluoruro ejerce efectos muy distintos en los niños pequeños, cuyos dientes se están formando y todavía no han hecho erupción. En las fases iniciales de la odontogénesis desempeñan una función clave las amelogeninas, proteínas que regulan la formación de cristales de hidroxilapatita. A medida que se forma la matriz cristalina, las amelogeninas se descomponen y son eliminadas del esmalte en maduración. Pero si el niño ingiere dosis elevadas de fluoruros (que son absorbidos en el tracto digestivo y transportados por la sangre hasta los dientes en formación), se desbarata el sistema de señales biológicas: las amelogeninas permanecen en el seno de los dientes en formación durante un tiempo excesivo, con lo que crean huecos en la estructura cristalina del esmalte. En consecuencia, los dientes con fluorosis que acaban haciendo erupción presentan a menudo una coloración desigual, con unas partes más blancas que otras (efecto óptico que se debe a la refracción de la luz que se refleja en el esmalte poroso). En los casos más graves, la superficie del diente aparece picada y las manchas son de color parduzco. La nutrición y la genética influyen en el riesgo de fluorosis, pero el factor determinante es, con mucho, la cantidad de flúor ingerida.

Financiado por el Instituto Nacional de Investigación Dental y Craneofacial, Levy se dispuso a determinar la cantidad de flúor que los niños ingieren y la forma en que afecta a sus dientes y huesos. No existe una dosis óptima de ingesta diaria de ion fluoruro

ANDREW SWIFT

universalmente aceptada (es decir, una dosis que proporcione máxima protección contra las caries a la vez que minimice otros riesgos), pero los expertos proponen valores que oscilan entre 0,05 y 0,07 miligramos de flúor por kilogramo de masa corporal y día.

Hace unos quince años, cuando los niños que participaban en el estudio de Levy eran muy pequeños, más de una tercera parte de ellos estaba ingiriendo suficientes fluoruros —sobre todo a través del agua con la que se preparaban papillas y biberones, de alimentos infantiles y de zumos envasados— para provocarles una fluorosis leve en la dentición permanente. Esa fracción apenas disminuyó con los cambios de dieta que se realizan al llegar a edad preescolar, un período crítico para la amelogénesis (formación del esmalte) en los dientes que todavía no han hecho erupción. La ingesta de flúor siguió siendo elevada durante esa fase del desarrollo, debido, sobre todo, a los dentífricos, que pasaron a ser la principal fuente de fluoruros. Aunque se supone que niños y adultos escupen la pasta dentífrica después de la limpieza bucal, Levy había observado en un estudio anterior que los niños de corta edad se tragan, por término medio, más de la mitad del dentífrico que utilizan.

Alrededor de los nueve años de edad, los niños de Iowa ya habían echado sus incisivos y colmillos permanentes. Sus dientes mostraban claras huellas de la exposición al flúor en tiempos anteriores. En los niños que de muy pequeños habían pertenecido al grupo de ingesta elevada de fluoruros, la probabilidad de que los dientes delanteros mostrasen manchas y señales de fluorosis era más del doble que en los niños del grupo con ingesta escasa. Conforme fue haciéndose más variada su dieta, se multiplicaron las fuentes de flúor. En ensayos realizados en el laboratorio de Levy se apreció, por ejemplo, que numerosas clases de zumos envasados y de bebidas gaseosas contienen bastante flúor (alrededor de 0,6 mg/L), por lo que un niño de tres años que bebiera un poco más de un litro al día de esos líquidos había ingerido ya la dosis óptima, sin contar la cuantía aportada por otras fuentes.

Docenas de productos alimentarios ensayados por el equipo de Levy contenían concentraciones de ion fluoruro todavía superiores: un promedio de 0,73 mg/L en un cóctel de arándanos, 0,74 mg/L en helados (tipo polo), 0,99 mg/L en gelatina de buey y 2,10 mg/L en carne de cangrejo enlatada. Aunque en la mayoría de los casos el flúor procedía del agua añadida durante el procesado alimentario, se apreciaron concentraciones elevadas también en uvas y pasas (debido a los pesticidas), derivados de pollo (por la molienda de huesos) y hojas de té (que absorben fluoruros del suelo y del agua).

Levy descubrió que el agua potable fluorada entrañaba un riesgo de fluorosis mayor todavía. Los niños de Iowa que residían en poblaciones donde el agua había sido fluorada tenían a los nueve años de edad una probabilidad de un 50 por ciento mayor de presentar una fluorosis leve en al menos dos de sus ocho dientes delanteros permanentes, si se comparaban con los niños que habitaban en regiones no fluoradas de ese estado (prevalencia del 33 por ciento en los primeros y del 22 por ciento en los segundos). El informe del NCR arrojó resultados similares: los bebés y niños pequeños (de uno o dos años) de las localidades con fluoración ingieren alrededor del doble de fluoruros del que debieran. Además, la comisión señaló que los adultos que ingieren grandes cantidades de agua, entre ellos los deportistas y los obreros manuales, superan las dosis óptimas de ingestión de flúor.

Excepto en los casos más graves, la fluorosis del esmalte dental no tiene sobre la salud mayores consecuencias que una posible pérdida de autoestima: las marcas que deja en los dientes son antiestéticas y no desaparecen (aunque existen tratamientos cosméticos). La cuestión que debería preocuparnos es si los efectos del flúor van más allá de la alteración de la amelogénesis. Pamela DenBesten, de la facultad de odontología de la Universidad de California en San Francisco, explica que el flúor influye en la interacción de las proteínas con el tejido mineralizado. Dada su gran potencia reactiva, el flúor podría causar alteraciones celulares en otros puntos.

Los tejidos óseos

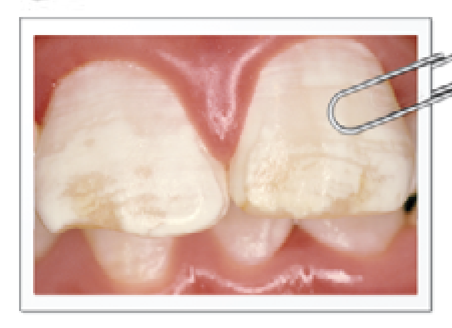
Al ser tan elevada la cantidad de ion fluoruro que se acumula en los huesos, éstos constituyen un buen lugar donde buscar huellas de la fluoración. Los estudios sobre pacientes con osteoporosis (una enfermedad que aumenta la fragilidad ósea y, por tanto, el riesgo de fracturas) han demostrado que las dosis elevadas de ion fluoruro estimulan la proliferación de osteoblastos (células que forman hueso) incluso en pacientes de edad avanzada. Al parecer, el ion fluoruro provoca el aumento de la concentración de proteínas tirosinfosforiladas que intervienen en las señales bioquímicas dirigidas a los osteoblastos.

Sin embargo, como en el caso del esmalte dental, el flúor no sólo estimula la mineralización del hueso, sino que modifica también su estructura cristalina. En tal caso, los efectos

SIGNOS DE FLUOROSIS

Un aporte excesivo de fluoruro altera en los niños el desarrollo de los dientes permanentes. Cuando salga esa dentición, podría observarse una decoloración del esmalte (*arriba*) o, en casos más graves, deformaciones (*abajo*). La prevalencia de ese trastorno, la fluorosis dental, es mayor en los sitios donde el agua potable está fluorada.





STEVEN M. LEVY *Universidad de Iowa*



DIETA FLUORADA

Se considera que el intervalo óptimo de ingestión de fluoruros —parámetro que proporciona máxima protección contra las caries a la vez que minimiza otros riesgos— se encuentra entre 0,05 y 0,07 miligramos diarios por kilogramo de masa corporal. El consumo de alimentos y bebidas con dosis elevadas de fluoruros hace que en la dieta se superen esos valores. Se presentan aquí las concentraciones de las trazas de fluoruro (en partes por millón) que contienen alimentos y bebidas, según un estudio realizado en la facultad de odontología de la Universidad de Iowa.

3,73 ppm **Infusión de té negro**

2,34 ppm **Pasas ▸**

2,02 ppm **Vino blanco**

1,09 ppm **Bebida con sabor a manzana**

0,91 ppm **Infusión de café**

0,71 ppm **Agua del grifo** (*promedio en EE.UU.*)

0,61 ppm **Caldo de pollo**

0,60 ppm **Bebida de cola "light"** (*promedio en EE.UU.*)

0,48 ppm **Perrito caliente**

0,46 ppm **Mosto**

0,45 ppm **Cerveza ▸**

0,45 ppm **Patatas fritas**

0,35 ppm **Queso "cheddar"**

0,33 ppm **Tortitas de harina**

0,32 ppm **Puré cremoso de maíz**

0,23 ppm **Helado de chocolate ▸**

0,13 ppm **Infusión de manzanilla**

0,03 ppm **Leche (2 % grasa)**

no son meramente estéticos. Pues aunque los fluoruros puedan aumentar el volumen óseo, la resistencia del hueso disminuye. Estudios epidemiológicos y ensayos con animales de laboratorio indican que una exposición intensa a fluoruros aumenta el riesgo de fracturas óseas, sobre todo en poblaciones más expuestas, como los ancianos y los diabéticos. Aunque esos estudios generan todavía bastante controversia, nueve de los doce miembros de la comisión del Consejo Nacional de Investigación llegaron a la conclusión de que la ingestión, durante toda la vida, de agua fluorada a concentraciones de 4 mg/L o mayores eleva el riesgo de fracturas óseas. (La comisión señalaba, asimismo, que la escasez de fluoruros pudiera aumentar ese riesgo, pero no existen pruebas inequívocas.)

Levy confía en que cuando los niños de Iowa lleguen a la adolescencia, los análisis de la longitud de su columna vertebral, huesos pélvicos y del esqueleto en general, permitan detectar posibles conexiones entre la ingesta de fluoruros y la salud ósea. En 2007 presentó datos preliminares: apenas halló diferencias en el contenido mineral de los huesos de niños de 11 años que pudieran asociarse a los fluoruros que ingirieron de pequeños. Con todo, al adentrarse en la adolescencia pudieran irse manifestando ciertas correlaciones.

La cuestión de verdadera importancia que se cierne sobre el debate de la fluoración es la de si estos efectos celulares sobre la dentición y la osificación constituyen signos de que los fluoruros afectan a otros órganos y desencadenan otras enfermedades, además de la fluorosis. El principal debate actual se centra en el osteosarcoma, que es la forma más común de cáncer óseo y la sexta entre los principales tipos de cáncer infantil. Dado que el ion fluoruro estimula la producción de osteoblastos, varios investigadores han sugerido que podría inducir tumores malignos al expandirse la población celular.

En un estudio realizado por el Programa Nacional de Toxicología del gobierno estadounidense en 1990 se apreció una correlación entre la ingestión de fluoruros e incidencia de osteosarcoma en ratas macho, a las que se administraron distintas concentraciones de fluoruros en la bebida (como es típico en los estudios sobre animales, las cantidades superaban el grado de fluoración del agua potable). Pero otros trabajos sobre animales, así como la mayoría de los estudios epidemiológicos sobre poblaciones humanas, han arrojado, en el mejor de los casos, resultados ambiguos.

La última polvareda sobre los fluoruros y el osteosarcoma la ha levantado Elise B. Bassin, de la facultad de odontología de Harvard. Bassin recopiló información sobre la exposición a fluoruros correspondiente a 103 pacientes de osteosarcoma y a 215 individuos de control convenientemente elegidos. Llegó a la conclusión de que los fluoruros constituyen un factor de riesgo de cáncer entre los jóvenes varones (los resultados para las jóvenes eran ambiguos). El informe de Bassin se publicó en la revista *Cancer Causes and Controls* en 2006. Sin embargo, en el mismo número, Chester Douglass (su director de tesis en Harvard) escribió un comentario en el que recomendaba a los lectores "extrema cautela" en la interpretación de los hallazgos de Bassin, dada la existencia de pruebas más precisas, todavía inéditas, que los contradecían. Los grupos contrarios a la fluoración y algunos ecologistas se apresuraron a acudir en defensa de Bassin; exigieron que la Universidad de Harvard abriese un expediente informativo a Douglass (investigador renombrado y catedrático de epidemiología en la facultad de odontología), a quien acusaron de prevaricar en la valoración del trabajo de Bassin, debido a un conflicto de intereses, pues Douglass es el jefe de redacción de un boletín de noticias odontológicas financiado por Colgate. El expediente universitario, resuelto ya en el mismo año 2006, concluía que no hubo ni prevaricación ni conflicto de intereses.

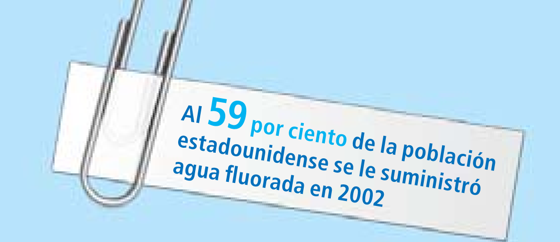
No menos intensos han sido los encontronazos sobre los posibles efectos neurológicos de los fluoruros. Phyllis Mullenix, del Instituto Forsyth de Boston, desencadenó una tormenta de fuego a principios de los años noventa al afirmar que, según sus experimentos con ratas de laboratorio, el fluoruro de sodio se acumulaba en tejidos cerebrales y afectaba a la conducta. Sus resultados sugerían una correlación entre la exposición prenatal a fluoruros y la conducta hiperactiva de las ratas jóvenes, sobre todo en los machos. La exposición postnatal, en cambio, provocaba efectos contrarios: convertía a las ratas hembra en individuos inactivos.

Aunque la investigación de Mullenix se acabó publicando en *Neurology and Teratology*, fue atacada por otros científicos, quienes le acusaron de utilizar una metodología sesgada y dosis excesivas.

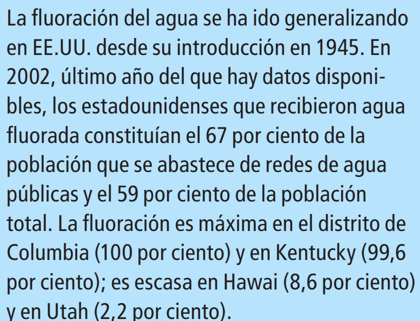
Sin embargo, una serie de estudios epidemiológicos posteriores realizados en China han asociado la exposición a dosis elevadas de

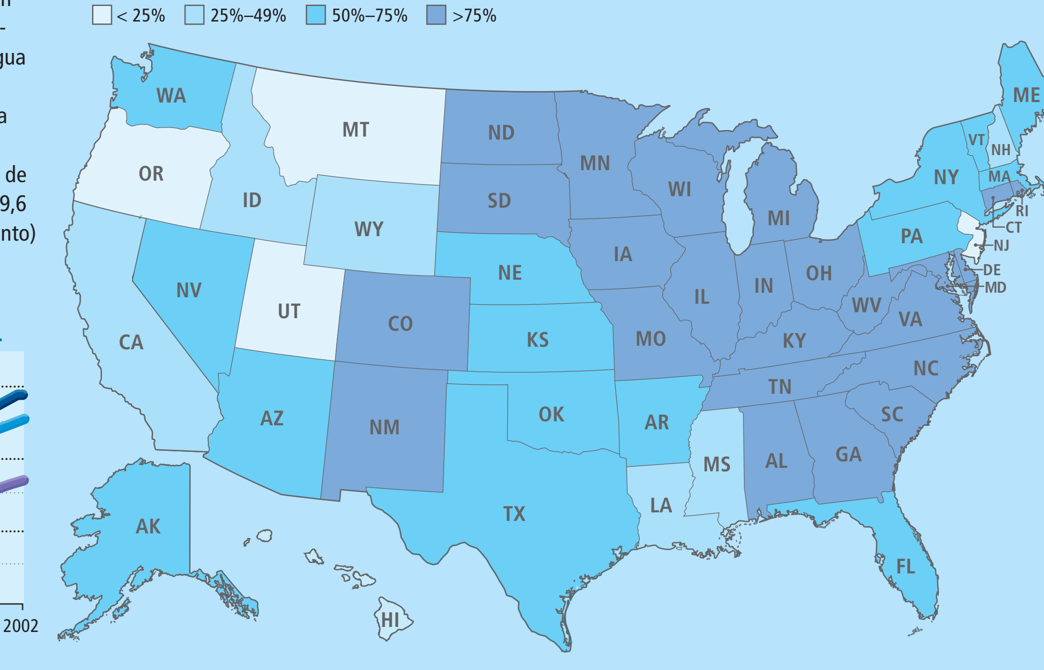
DAVID ROSENBERG *Getty Images* (*salchicha*); IMAGE SOURCE PINK/GETTY IMAGES (*pasas*); JONATHAN KITCHEN *Getty Images* (*cerveza*); C SQUARED STUDIOS/GETTY IMAGES (*helado*)

LA FLUORACION EN ESTADOS UNIDOS



La fluoración del agua se ha ido generalizando en EE.UU. desde su introducción en 1945. En 2002, último año del que hay datos disponibles, los estadounidenses que recibieron agua fluorada constituían el 67 por ciento de la población que se abastece de redes de agua públicas y el 59 por ciento de la población total. La fluoración es máxima en el distrito de Columbia (100 por ciento) y en Kentucky (99,6 por ciento); es escasa en Hawai (8,6 por ciento) y en Utah (2,2 por ciento).





*No se cuenta con datos sobre el suministro público de agua anteriores a 1964

fluoruros con la disminución del cociente intelectual. Ello se ha atribuido a la formación de complejos de fluoruro de aluminio, pequeñas moléculas inorgánicas que, al ser su estructura remedo de los fosfatos, influyen en la actividad enzimática cerebral. Existen indicios de que los silicofluoruros utilizados en la fluoración del agua pueden incrementar la absorción de plomo en el cerebro.

Los fluoruros podrían repercutir en al sistema endocrino. La comisión del NRC arribó a la conclusión de que el ion fluoruro altera sutilmente la función endocrina, sobre todo en el tiroides (glándula que produce hormonas reguladoras del crecimiento y del metabolismo). Aunque no se sabe en qué medida influye sobre la tiroides la ingesta de fluoruros, sus efectos parecen hallarse condicionados por la dieta y la genética.

Una controversia inacabable

La publicación del informe del NRC no ha desencadenado una estampida generalizada en contra de la fluoración; tampoco ha inducido a la Agencia de Protección Ambiental (EPA) a rebajar la concentración límite de ion fluoruro de 4 mg/L. (La Agencia dice estar todavía estudiando la cuestión.) Las compañías de aguas suelen mantener la concentración de fluoruros entre 0,7 y 1,2 mg/L, muy por debajo del límite de la EPA. Alrededor de 200.000 estadounidenses, y varios millones de personas en China, India, Oriente Medio y Africa, están ingiriendo concentraciones que superan el límite recomendado, pero tal exceso se debe a causas naturales: escorrentías sobre rocas que contienen fluoruros o lixiviación de tierras cercanas a las fuentes de abastecimiento.

Con todo, el informe ha despertado el interés de algunos expertos. Se preguntan si incluso 1 mg/L de fluoruros en el agua potable no resultará una concentración excesiva, pues cada vez se reconoce con mayor claridad que los alimentos, las bebidas y los productos de higiene dental constituyen importantes fuentes adicionales de fluoruros, sobre todo para los más pequeños.

La comisión del NRC no se ocupó de forma explícita de esa cuestión, pero de sus análisis se sugiere que rebajar la fluoración del agua entraña riesgos. En la opinión de John Doull, profesor emérito de farmacología y toxicología del hospital de la Universidad de Kansas y presidente de la comisión del NCR, en lo que atañe a los fluoruros se ha mantenido la situación durante muchos, demasiados, años; ya es hora de volver a examinar la cuestión sin prejuicios.

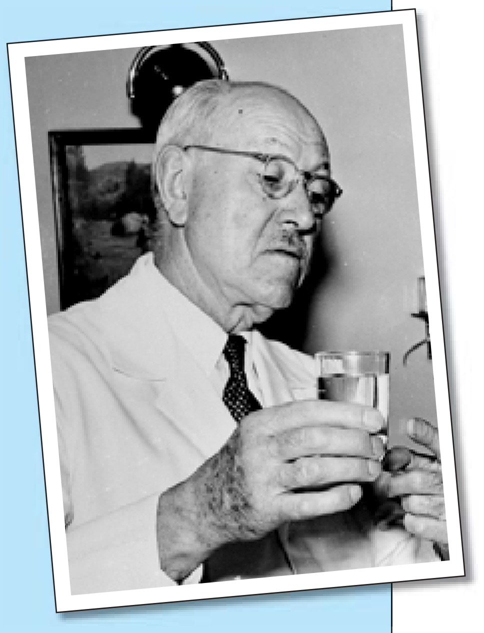
Se tiende a pensar que el asunto está resuelto. Cuando el ministerio de sanidad lo considera uno de los 10 mayores logros del

LUCY READING-IKKANDA (*mapa y gráfica*); MOODBOARD/CORBIS (*clip*)

HISTORIA DE LA FLUORACION

Se conocieron antes los peligros de los fluoruros que las ventajas. Durante el primer decenio del siglo XX, Frederick McKay, dentista de profesión, recorrió el Oeste norteamericano para investigar lo que entonces se denominaba "mácula parda de Colorado". McKay y G. V. Black, decano de la facultad de odontología de la Universidad Noroccidental, descubrieron que los niños nacidos en Colorado Springs, tenían los dientes manchados, mientras que los adultos que se habían instalado allí, no. Conjeturaron que los niños cuyos dientes no habían hecho erupción todavía o no habían desarrollado el esmalte eran quienes corrían mayor riesgo de sufrir la mancha. McKay, que intuía que la mácula estaba provocada por algún componente desconocido del agua de consumo local, observó otro fenómeno curioso: los dientes moteados presentaban una sorprendente resistencia a las caries.

La causa siguió en el misterio hasta 1930, cuando McKay fue a Arkansas a investigar los casos de maculación dental en Bauxite, una ciudad minera propiedad de Alcoa ("Aluminium Company of America"). Temeroso de que se pudiera culpar al aluminio, H. V. Churchill, responsable químico de Alcoa, analizó el agua de la localidad; descubrió algo que McKay nunca había sospechado: concentraciones elevadas de ion fluoruro natural. McKay analizó de inmediato otras fuentes de agua sospechosas: observó que allí donde la concentración de fluoruros era elevada (2,5 miligramos por litro o superior), menudeaba la mácula parda de Colorado. Una nueva enfermedad ingresó en el léxico: la fluorosis.



EL DENTISTA DE COLORADO Frederick McKay descubrió los efectos del flúor en los dientes.

Animado por los descubrimientos de Churchill y McKay, Henry Trendley Dean, director de la unidad de higiene dental del Instituto Nacional de la Salud, se propuso averiguar cuánto ion fluoruro se requería para provocar fluorosis. A finales de los años treinta había determinado que, a concentraciones inferiores a 1 mg/L, el riesgo era escaso. Las observaciones de McKay (que los dientes con fluorosis eran resistentes a las caries) inspiraron a Dean. Se propuso ensayar, a escala urbana, una idea revolucionaria: la adición deliberada de fluoruros al agua potable, en concentraciones que previnieran caries pero no provocasen fluorosis. Vio cumplido su deseo en 1945, en Grand Rapids. Dean se convirtió en el principal abogado y defensor de la fluoración tras ser nombrado, en 1948, primer director del entonces recién constituido Instituto Nacional de Salud Dentaria, hasta su jubilación, en 1953.

siglo XX, resulta difícil contradecirle. Pero si revisamos la bibliografía al respecto, encontramos un sinfín de cuestiones pendientes. Los conocimientos son todavía insuficientes. De ahí que la fluoración siga en entredicho tantos años después de su implantación. La ignorancia ceba la controversia.

Por otra parte, no faltan los expertos que hacen caso omiso de los indicios de posibles efectos nocivos de los fluoruros (más allá de los dientes y los huesos); continúan insistiendo en que se generalice la fluoración del agua en los EE.UU. y todos los demás países. Su opinión sigue constituyendo la postura oficial de la Asociación Dental y el Servicio de Salud Pública estadounidenses. Según Jayanth V. Kumar, director de vigilancia e investigación en salud bucal en el Departamento de Sanidad del estado de Nueva York y miembro del comité del NRC, el número elevado de poblaciones con índice de caries elevado justifica la fluoración. Kumar —que discrepó de algunos de los hallazgos del comité del NRC— admite que los argumentos a favor de la fluoración no son ahora tan sólidos como antaño en las comunidades que disponen de buena alimentación y atención dental. Cuando la prevalencia de caries es escasa, quizás el retorno de inversión (del costo de la fluoración) no compensa.

En el ínterin, el informe del NRC ha vuelto osados a quienes se oponen a la fluoración. Paul Connett, químico de la Universidad de St. Lawrence y director de Fluoride Action Network, uno de los grupos antifluoración más activos del mundo, asegura que la labor de la Comisión reviste interés máximo, pues por primera vez una comisión cualificada ha examinado el problema y ha planteado cuestiones relevantes. Se trata de un auténtico cambio de rumbo científico. Por fin, los datos están sobre la mesa. El flúor es la droga más consumida en los Estados Unidos. El debate sobre la fluoración no puede esperar más.

BETTMANN/CORBIS

Bibliografía complementaria

PATTERNS OF FLUORIDE INTAKE FROM BIRTH TO 36 MONTHS. Steven M. Levy, John J. Warren, Charles S. Davis, H. Lester Kirchner, Michael J. Kanellis y James S. Wefel en *Journal of Public Health Dentistry*, vol. 61, n.º 2, págs. 70-77; junio de 2001.

PATTERNS OF FLUORIDE INTAKE FROM 36 TO 723 MONTHS OF AGE. Steven M. Levy, John J. Warren y Barbara Broffitt en *Journal of Public Health Dentistry*, vol. 63, n.º 4, págs. 211-220; diciembre de 2003.

TIMING OF FLUORIDE INTAKE IN RELATION TO DEVELOPMENT OF FLUOROSIS ON MAXILLARY CENTRAL INCISSORS. Liang Hong, Steven M. Levy, Barbara Broffitt, John J. Warren, Michael J. Kanellis, James S. Wefel y Deborah V. Dawson en *Community Dentistry and Oral Epidemiology*, vol. 34, n.º 4, págs. 299-309; agosto de 2006.

AGE-SPECIFIC FLUORIDE EXPOSURE IN DRINKING WATER AND OSTEOSARCOMA. Elise B. Bassin, Dvid Wypij, Roger B. Davis y Murray A. Mittelman en *Cancer Causes and Control*, vol. 17, n.º 4, págs. 421-428; mayo de 2006.

CAUTION NEEDED IN FLUORIDE AND OSTEOSARCOMA STUDY. Chester W. Douglass y Kamundi Joshipura en *Cancer Causes and Control*, vol. 17, n.º 4, págs. 481-482; mayo de 2006.

FLUORIDE IN DRINKING WATER: A SCIENTIFIC REVIEW OF EPA'S STANDARDS. National Academy of Sciences, 2006.

El calentamiento global en el Artico

Maria Montserrat Sala y Carlos M. Duarte

Las zonas polares son las más afectadas por el calentamiento global, al provocar una reducción de la capa de hielo y nieve que viene cubriéndolas desde hace milenios. El océano Polar Artico, rodeado de países industrializados con elevadas tasas de emisión de gases de efecto invernadero, es la zona del planeta donde mayor alteración causa ese calentamiento.

Según los datos disponibles, la temperatura aumenta 0,4 ºC en el Artico cada decenio. La capa de hielo ha perdido más de un 15 por ciento de su extensión y un 30 por ciento del grosor. El deshielo estival acaecido en 2007 superó todos los precedentes. Se han perdido más de un millón de kilómetros cuadrados más que en 2005, el año que ostentaba el récord anterior. El deshielo del Artico altera las corrientes marinas y, con ello, su función en la regulación climática. Repercute también en los seres vivos que allí habitan. Osos polares, morsas, focas y otros mamíferos están perdiendo hábitat.

En ese ecosistema existen, sin embargo, otros organismos, menos conocidos, que también se ven afectados por la reducción de la capa de hielo. Nos referimos al plancton. El deshielo del Artico no sólo libera agua, sino que arroja también materia orgánica, nutrientes y contaminantes acumulados en el hielo (sustancias tóxicas que la actividad humana viene emitiendo a la atmósfera desde la revolución industrial). El efecto de esos contaminantes sobre el plancton se desconoce todavía.

1. El ecosistema del Artico está amenazado por el calentamiento global.



2. Los osos polares dependen de las plataformas de hielo para cazar focas, su principal fuente de alimento. El retroceso de las plataformas les obligaría a cazar en tierra, donde son menos diestros, lo que repercutiría en el éxito reproductivo de la especie.

3. *Calanus hyperboreus* (*izquierda*) es el principal organismo zooplanctónico del ecosistema ártico. Se alimenta, entre otros organismos, de *Phaeocystis* (*arriba*), una de las principales especies fitoplanctónicas. Este alga debe su éxito a la segregación de mucílago y a la formación de colonias que resultan inaccesibles para los depredadores.

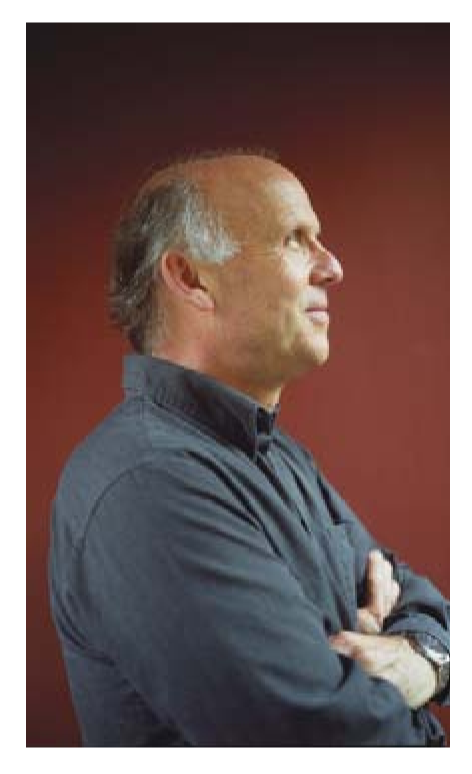
CAMPAÑA ATOS (*oso y foca*); DOLORS VAQUE (*Phaeocystis*), ALBERT CALBET (*Calanus hyperboreus*)

Richard Wrangham: La cocina cerebral

Richard Wrangham mantiene que el alimento crudo no les hubiera bastado a nuestros antecesores homínidos para sustentar nuestro voluminoso cerebro, ávido consumidor de calorías. El secreto de nuestra evolución reside en la cocina

Rachael Moeller Gorman

Richard Wrangham ha probado la comida de los chimpancés, y no le gusta. "La fruta habitual en su menú es bastante desagradable", declara este antropólogo biológico de la Universidad de Harvard. Los frutos ineludibles en la dieta de los chimpancés, duros y de formas caprichosas, algunos parecidos a las cerezas, otros con forma de pequeños chorizos: son "fibrosos, y demasiado amargos. No es que tengan mucho azúcar. Algunos revuelven el estómago." Tras unas cuantas degustaciones en Uganda occidental, donde trabaja parte del año en un proyecto para estudiar los chimpancés salvajes que dura ya dos decenios, Wrangham llegó a la conclusión de que ningún ser humano hubiera sobrevivido mucho tiempo con esa dieta. Aparte del gusto desagradable, nuestras débiles mandíbulas, diminutos dientes y pequeñas vísceras nunca hubieran llegado a triturar y procesar suficientes calorías como para sustentar estos generosos cuerpos.



Luego, en una fría tarde de otoño de 1997, ensimismado con el fuego de su chimenea, en Cambridge, Massachusetts y meditando sobre otra cuestión totalmente diferente —¿qué estimuló la evolución humana?— se acordó de la comida de los chimpancés. "Me di cuenta de la radical diferencia que podría suponer el cocinar", dice Wrangham. Supuso que cocinar podría haber tornado mucho más digestivos los frutos fibrosos, a la vez que los tubérculos y la correosa carne cruda que los chimpancés también comen. Se los ingeriría más deprisa y digeriría con menor gasto de energía.

Esta innovación podría haber facilitado que las entrañas de nuestros antepasados, afines a los chimpancés, menguaran a medida que evolucionaban; la energía que de otro modo se hubiera destinado a sustentar un tracto digestivo de mayor tamaño pudo desencadenar la evolución de nuestros precursores, con un cerebro más voluminoso y un cuerpo más corpulento y parecido al actual.

En estos 10 años que han pasado desde la presentación de su hipótesis, Wrangham ha reunido numerosas pruebas en su favor, pero muchos arqueólogos, paleontólogos y antropólogos disienten de plano. Wrangham investiga sobre los chimpancés, objetan; no es un experto en evolución humana. Pisa terreno ajeno. Además, el registro arqueológico no corrobora el uso controlado del fuego durante la época en la que la propuesta de Wrangham así lo requiere.

Wrangham, cuyo primer encuentro con los chimpancés se remonta a 1970, siendo alumno de Jane Goodall, comenzó su andadura observando la repercusión de las presiones ecológicas, y especialmente la distribución de la comida, sobre la sociedad de los chimpancés. Se hizo famoso con su investigación sobre la violencia de los chimpancés, que plasmó en *Demonic Males*, libro publicado en 1996. Pero desde que se quedó ensimismado contemplando aquel fuego hace 10 años, no ha dejado de pensar en los mecanismos de la evolución humana. "Tiendo a pensar en la evolución humana desde el punto de vista de los chimpancés", señala. "¿Qué se precisa para convertir a un ancestro nuestro, afín a un chimpancé, en un humano?" Pues un fuego para que cocine, concluyó, lo cual redundaría en un cuerpo y un cerebro mayores.

Y eso fue justo lo que encontró en *Homo erectus*, precursor que surgió hace entre 1,6 y 1,9 millones de años. El cerebro de *H. erectus* era un 50 por ciento mayor que el de su predecesor, *H. habilis*, y experimentó la reducción en el tamaño de los dientes más significativa de toda la evolución humana. "En ningún otro momento se ven cambios corporales tan acordes con los que cabría esperar de

KATHLEEN DOOHER

RICHARD WRANGHAM

A FUEGO LENTO: Sostiene que la práctica de cocinar los alimentos, comenzada por *Homo erectus*, acabó permitiendo que el cerebro humano creciera hasta su tamaño actual.

DEL FUEGO A LA SARTEN: Su teoría tiene muchos detractores porque sólo se dispone de indicios aislados sobre el uso del fuego por parte de *H. erectus*. Un caso es el de un yacimiento chino donde *H. erectus* pudo haber escupido en una hoguera bayas, que dan lugar a unas chispas impresionantes.

EN EL FOGON: "A todo el mundo le gusta comer caliente todos los días".

que se cocinasen los alimentos", dice Wrangham.

El problema con esta conjetura estriba en el carácter endeble de los indicios de que el hombre controlara el fuego en épocas tan lejanas. Otros investigadores creen que el hombre empezó a cocinar hace sólo unos 500.000 años. Las pruebas fehacientes no se dan sino mucho más tarde, cuando los neandertales tuvieron que vérselas con una edad de hielo. "Cocinaban en la tierra", dice C. Loring Brace, antropólogo de la Universidad de Michigan en Ann Arbor. "Y eso aconteció hace unos doscientos mil años escasos." Tanto él como otros postulan que fue la introducción de productos animales blandos y ricos en energía, no del cocinar, lo que desembocó en el cerebro más voluminoso y dientes más pequeños de *H. erectus*.

Lo cual indujo a Wrangham a profundizar en sus investigaciones. Estudió grupos de cazadores-recolectores modernos por todo el mundo y encontró que ningún grupo de humanos de los que viven actualmente come siempre alimentos crudos. Los seres humanos parecen estar singularmente bien adaptados para consumir alimentos cocinados. El hombre de nuestros días necesita gran cantidad de calorías de alta calidad (el tejido del cerebro requiere 22 veces más energía que el de los músculos); los frutos duros y fibrosos y los tubérculos no constituyen una provisión suficiente.

Wrangham y sus colegas calcularon que *H. erectus* (que era de la talla de *H. sapiens*) debería comer unos 6 kilogramos de alimentos vegetales sin preparar cada día, o bien 3 kilos de vegetales y carne cruda, para obtener suficientes calorías. Estudios con mujeres actuales indican que las que siguen una dieta vegetariana estricta con frecuencia se saltan alguna menstruación a causa de la carencia de energía. La adición de carne cruda tampoco resulta de gran ayuda. Wrangham demostró que, a la velocidad a que mastican los chimpancés (suministradora de unas 400 calorías por hora), hubiera sido necesario que *H. erectus* se pasara entre 5,7 y 6,2 horas al día comiendo para obtener el suministro de energía requerido. Es decir, que todo el tiempo que no empleara haciendo acopio de provisiones lo habría tenido que destinar a masticarlas.

Para corroborar que cocinar ahorra energía, Wrangham se asoció con Stephen Secor, biólogo de la Universidad de Alabama estudioso del diseño evolutivo del sistema digestivo. Encontraron que a la serpiente pitón (se la utiliza como modelo animal porque las reacciones de su tracto digestivo son fáciles de abordar) le resulta mucho menos oneroso digerir alimentos cocinados que crudos. El calor altera la estructura física de proteínas y almidones, lo cual redunda en una degradación enzimática más sencilla.



C. LYTTLE *zefa/Corbis*

Al cavilar sobre lo que pudo estimular la evolución humana, "me di cuenta de la tremenda diferencia que suponía el cocinar", dice Richard Wrangham.

La teoría de Wrangham cuadraría satisfactoriamente de no ser por el engorroso problema del dominio del fuego. Wrangham aduce que los testimonios de algunas fogatas antiguas podrían indicar que *H. erectus* controlaba el fuego. En Koobi Fora (Kenia), Ralph Rowlett, antropólogo de la Universidad de Missouri en Columbia, ha encontrado tierra calcinada hace 1,6 millones de años que contiene una mezcla de diversas leñas, lo cual demuestra que el fuego se prendió a propósito, y además sin trazas de raíces quemadas bajo el suelo. (Un árbol alcanzado por un rayo dejaría sólo un tipo de madera y raíces quemadas.) Encaja con un fuego encendido por seres humanos. Rowlett se propone estudiar a continuación los gránulos de almidón encontrados en la zona para ver si allí se pudieron cocinar alimentos.

A pesar de todo, la mayoría de los investigadores replican que, a no ser que se confirme asiduamente la existencia de hogueras controladas en la mayoría de los yacimientos de *H. erectus*, seguirán recelando de las especulaciones de Wrangham. Además, existen otras teorías sobre la alimentación que pueden explicar el crecimiento del cuerpo y del cerebro sin necesidad de recurrir al fuego. Una de ellas es la hipótesis de los tejidos suculentos, propuesta en 1995 por Leslie C. Aiello, profesor emérito de antropología biológica en el Colegio Universitario de Londres, y por el fisiólogo Peter Wheeler, de la Universidad John Moores de Liverpool.

La noción principal de su hipótesis (que los tractos intestinales más pequeños están correlacionados en los primates con cerebros mayores) concuerda con los supuestos de Wrangham, pero Aiello y Wheeler piensan que la razón por la que los humanos desarrollaron estas características son los alimentos de origen animal, ricos en energía, tales como los tuétanos o los sesos, y no el cocinar.

Ya que carece de pruebas de que *H. erectus* utilizara profusamente el fuego, Wrangham espera que el análisis del ADN acuda en su ayuda. "Sería muy interesante comparar los datos genéticos del humano y de *Homo erectus* para ver cuándo surgieron ciertas características; por ejemplo, cuándo desarrollaron los humanos mejores defensas contra los productos de la reacción de Maillard", indica, refiriéndose a que los productos químicos resultantes de cocinar algunos alimentos pueden dar lugar a carcinógenos.

Aun cuando no se dispusiera de tales pruebas, algunos piensan que la teoría de Wrangham es justo lo que se necesita para reavivar la ciencia de la evolución humana. "Da igual quién elabore esas ideas", dice Aiello, presidente de la fundación Wenner-Gren, que financia la investigación en antropología. "Hay que escuchar lo que dice Richard porque tiene algunos datos muy interesantes y originales. A veces las ideas más creativas llegan de sitios inesperados". Recuerda la figura de Goodall, que sorprendió a todo al mundo al probar que los seres humanos no son los únicos que fabrican herramientas. "Es uno de los mejores casos que conozco del valor que tiene la investigación sobre los primates en lo concerniente a conformar nuestro conocimiento sobre la evolución humana y la adaptación", expone Aiello.

Si las ideas de Wrangham resultan ser ciertas, deberíamos estar agradecidos al primer *chef* de los homínidos, quien fuese que sacara del fuego un tubérculo asado para comérselo. Sin esa persona, puede que nunca hubiéramos sido capaces de estudiar nuestros orígenes.

El origen de las larvas

Las diferencias morfológicas entre los animales adultos y sus larvas pueden ser reflejo de genomas fusionados, expresados de forma secuencial

Donald I. Williamson y Sonya E. Vickers

CONCEPTOS BASICOS

- La teoría clásica de la evolución biológica considera que ésta transcurre mediante continuas adaptaciones y mutaciones. La historia natural de Darwin presenta el aspecto de un árbol con ramificaciones crecientes desde un tronco común.
- La teoría del "equilibrio puntuado", basada en las ráfagas de actividad y períodos de estasis que presenta el registro fósil, sugiere que las especies aparecen de golpe y plenamente constituidas.
- La hipótesis de la transferencia larvaria introduce otro matiz: la posibilidad de que un animal se convierta, mediante hibridación, en la larva de otro. Numerosas fecundaciones cruzadas entre especies, géneros o incluso filos habrían convertido el árbol de Darwin en un arbusto enmarañado.

Desde los inicios de la biología evolutiva (cuando un joven Charles Darwin trabajaba con percebes, organismos con concha que adhieren su parte posterior a las rocas y que empujan con las patas la comida hacia la boca) los evolucionistas sienten fascinación por las formas, múltiples y curiosas, que adoptan los seres vivos. El naturalista que se enfrenta a particularidades morfológicas, ciclos biológicos o comportamientos para los que no se ha encontrado todavía explicación, busca una respuesta científica. Hace unos 150 años, un empeño así dio lugar al *Origen de las especies*, que sentaría las bases de la que sigue constituyendo la teoría fundamental sobre los cambios que han experimentado plantas y animales a lo largo del tiempo.

El número de animales que eclosionan o se paren supera al de los que sobrevivirán y tendrán descendencia, escribió Darwin. Bajo esa presión, las poblaciones cambian de manera gradual con el tiempo; producen una "descendencia modificada". Darwin resaltó la naturaleza gradual del cambio morfológico en los seres vivos que hoy denominamos evolución: la acumulación de cambios, o mutaciones, a través de la herencia.

Pero no todos los evolucionistas aceptan la idea de la gradualidad del cambio. De hecho, hallamos en la naturaleza formas que se explican sólo mediante un cambio *repentino*. Uno de los autores (Williamson) se ha centrado en un ejemplo arquetípico, las larvas, formas jóvenes características que adoptan numerosos animales. Las larvas difieren de los adultos hasta tal punto, que parecen especies distintas. Y pudieran serlo, en cierto modo.

La teoría de la "transferencia larvaria" avanzada por Williamson propone que las larvas, y los genes que las determinan, han sido transferidos de un linaje animal hereditario a otro por medio de fecundaciones cruzadas entre especies, géneros o incluso filos. Ello sugiere una hipótesis que se desmarca del pensamiento evolutivo mayoritario: ¿podrían ser híbridos los animales con formas larvarias, es decir, resultado de una fusión de genomas en la que ambos se expresan de manera secuencial durante el ciclo biológico?

Las larvas, consideradas estados inmaduros en numerosos ciclos biológicos, abundan sobre todo en el plancton marino. La oruga que teje la crisálida a partir de la que eclosiona una mariposa adulta medra en tierra, pero la transformación larva-adulto más espectacular pertenece al medio marino. Los bivalvos, estrellas de mar y erizos marinos liberan los huevos y el esperma al mar, donde se produce la fecundación.

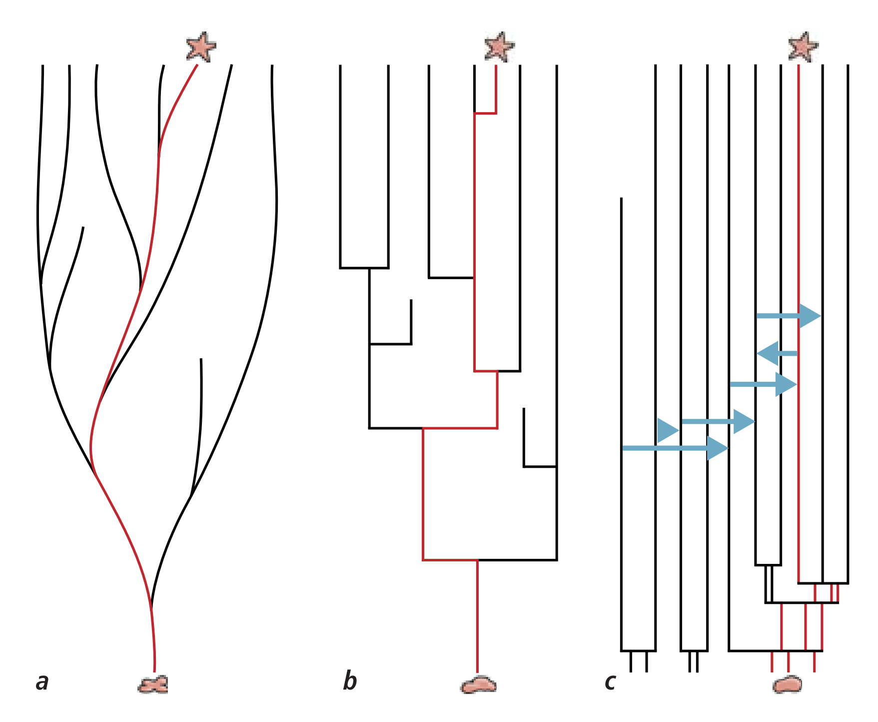
Según la hipótesis de la transferencia larvaria, todas las larvas se han transferido a sus linajes actuales a partir de otros grupos animales con un parentesco evolutivo remoto mediante fecundación cruzada. En el lenguaje científico del siglo XXI, diríamos que una parte de la dotación genética de un animal, o genoma, fue adquirida por otro, dando lugar a una quimera.

Siguiendo los postulados de Darwin, la mayoría de los biólogos acepta la teoría del "linaje común" o la "filiación directa": la larva y la forma adulta comenzaron siendo un único individuo; andando el tiempo, la forma juvenil se apartó cada vez más de la morfología del adulto. Hasta hace poco, no había una teoría alternativa. Las anomalías inexplicables se consideraban meras curiosidades. Según la opinión generalizada, las semejanzas entre multitud de

D. P. WILSON/FLPA/*American Scientist*



1. *LUIDIA SARSI*. Esta estrella de mar medra en el mar del Norte y a lo largo de las costas sur y oeste de las Islas Británicas. A partir de un huevo fecundado se desarrolla una larva con simetría bilateral, en cuyo interior crece luego un individuo juvenil que presenta la simetría radial de las estrellas de mar. En un extraño ciclo biológico, el juvenil migra hacia el exterior y abandona la larva nadadora (la forma translúcida que se observa en la fotografía); cada uno sigue una vida independiente durante un período de tiempo que puede llegar a los tres meses. Según la hipótesis de la transferencia larvaria, esa singularidad responde a la fusión de los genomas de dos animales marinos ancestrales, que hibridaron para convertirse uno en la larva del otro. Además de aportar respuestas a cuestiones abiertas sobre la biología evolutiva del desarrollo, esa propuesta radical sugiere —junto a otras— que "el árbol de la vida" propuesto por Charles Darwin guardaría mayor semejanza con un arbusto.



2. A PARTIR DE DARWIN, LA TEORIA CLASICA ha considerado que la evolución biológica transcurre mediante continuas adaptaciones y mutaciones. El árbol de la vida de Darwin presentaría un aspecto dendriforme: cada bifurcación indica un ancestro común y las ramas truncadas corresponden a extinciones (*a*). En 1972, Niles Eldredge y Stephen Jay Gould, al detectar períodos de intensa actividad en el registro fósil, introdujeron el concepto de "equilibrio puntuado"; sugirieron que las especies surgen plenamente constituidas (*b*). La hipótesis de la transferencia larvaria de Williamson introduce otro matiz: la posibilidad de que un animal se convierta en la larva de otro, incluso entre animales remotamente emparentados, mediante hibridación, estableciendo así una conexión entre dos ramas del árbol de la vida (*c*). Los diagramas representan los orígenes ancestrales de una hipotética estrella de mar (*rojo*), una de las diversas especies que pueden haber adquirido larvas mediante hibridación (*flechas azules*).

STEPHANIE FREESE, ADAPTADO DE UN DIAGRAMA DE SONYA E. VICKERS/*American Scientist*

larvas se deben a la evolución convergente. Declara ésta que muchos organismos habrían llegado a la misma solución al tratar de resolver problemas comunes; así, la dispersión o la alimentación.

En este artículo presentamos otra teoría sobre el origen de las larvas, que se aleja de la tesis del "linaje común", aunque no deja de ser coherente con la teoría de Darwin sobre la selección natural:

En su origen, larvas y adultos correspondían a animales distintos; cada uno se desarrollaba a partir de su propio tipo de huevo. En algún momento del pasado evolutivo, sus ancestros se cruzaron y generaron descendencia. La mayoría de los híbridos no sobrevivió. La expresión de genomas tan distintos (la traducción de genes a proteínas) entrañaba serias dificultades. Los pocos híbridos que sobrevivieron resolvieron el dilema mediante la expresión secuencial, no simultánea pues, de los genomas combinados: primero los genes de la larva y después los del adulto. El nuevo animal combinado sobrevivió. Siguió reproduciéndose y generando formas especializadas, mucho mejor dotadas para procurarse hábitat y comida y, posteriormente, en la forma adulta, para diseminar sus genes. El legado que ha quedado tras la combinación de líneas ancestrales distintas corresponde al estado de transición que denominamos metamorfosis, la etapa en que la larva se transforma en adulto. Con frecuencia, el resultado no es la transformación, sino la muerte.

El árbol de la vida

El *Origen de las especies* aportó a la ciencia una poderosa metáfora: el árbol de la vida. La visión darwinista de la historia natural corresponde a un árbol cuyo tronco se enraíza en un antepasado común. Las ramas (las ramificaciones principales a partir de las cuales divergen nuevas ramas y donde cada bifurcación representa un ancestro común) corresponden a las formas de vida que fueron apareciendo con el tiempo. La mayoría de las ramas no alcanza la copa (que describe el presente): más del 99 por ciento de los organismos que aparecieron sobre la Tierra en tiempos remotos pertenecen a formas extintas.

En 1972, Niles Eldredge y Stephen Jay Gould introdujeron el "equilibrio puntuado", un concepto que se proponía sustituir al árbol de ramificación gradual de Darwin. Eldredge y Gould señalaron que el registro fósil contradecía las "numerosas, sucesivas y leves modificaciones" descritas por Darwin. Una especie, declaraban, no surge de manera gradual a partir de una transformación continua de sus antepasados, sino que aparece de golpe, plenamente formada. El "equilibrio puntuado" explica el registro fósil mediante pulsos de actividad seguidas de períodos de estasis. El esquema que esbozan Eldredge y Gould en sustitución del árbol de Darwin presenta el aspecto de un candelabro.

La transferencia larvaria constituye uno más de los fenómenos que conforman un tipo de árbol más tupido, donde las ramas se fusionan en alguna ocasión. Aunque menos estructurado, el concepto se había avanzado ya. En los animales dotados de sexualidad, la fecundación fusiona genomas, entre miembros de la misma especie por lo común.

Pero la fusión de genomas acontece también entre reinos biológicos distintos, como ocurre en los líquenes. Esas manchas de color gris verdoso que cubren rocas y árboles corresponden a formas de vida compuestas: fusiones entre un alga verde del reino de los protistas (o una cianobacteria del reino de los procariotas) con un ascomiceto específico del reino de los hongos.

A finales de 2006, se descubrió que el genoma de la mosca de la fruta *Drosophila ananassae* albergaba en su interior el genoma

completo de la bacteria *Wolbachia*, de modo que cada generación de insectos heredaba de sus progenitores el genoma del parásito. En opinión de W. Fred Doolittle, de la Universidad Dalhousie, ese descubrimiento constituye una prueba de la existencia generalizada y elevada frecuencia de un proceso que hasta hace poco hubiéramos tildado de fantasía científica: la transferencia horizontal de genes entre organismos superiores.

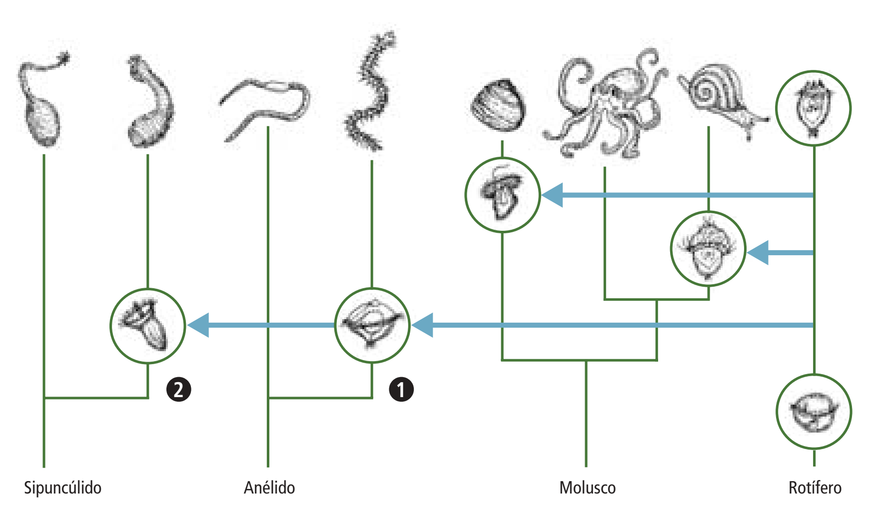
Cada seis u ocho semanas, la fusión de un hongo con *Nostoc* (una cianobacteria) origina ejemplares adultos de *Geosiphon pyriforme*, un organismo que presenta el aspecto de un musgo pequeño y bulboso. Lynn Margulis, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, ha estudiado la que quizá sea la fusión de genomas por excelencia: la que tuvo lugar cuando las bacterias que respiraban oxígeno atmosférico se fusionaron, hace unos dos mil millones de años, para dar lugar a protistas aeróbicos con mitocondrias. Lo novedoso de la hipótesis de la transferencia larvaria no es la fusión permanente de dos genomas, sino el hecho de que cada uno supervise una etapa del ciclo biológico del animal resultante. Durante la metamorfosis, se produce un "cambio de guardia" radical.

Si el animal adulto y su larva corresponden a una quimera que ha evolucionado a partir de la fusión de dos animales distintos, el esquema de la historia natural no debería dibujar un árbol, sino una red. La propia hipótesis de la transferencia larvaria nos ofrece un mecanismo plausible para el "equilibrio puntuado" de Eldredge y Gould.

Transferencia larvaria

Williamson rehace la historia del origen de la hipótesis de la transferencia larvaria en los términos siguientes: Todo comenzó con los cangrejos esponja y los cangrejos ermitaños. Estudié primero los cangrejos ermitaños, así llamados porque introducen su abdomen en el caparazón de un caracol y lo llevan consigo a todas partes. (Pese al nombre, no son cangrejos genuinos.) Los comparé con los cangrejos esponja, cangrejos reales, que transportan sobre su caparazón fragmentos de esponjas. Los adultos difieren de una especie a otra, sin parentesco alguno. Las larvas, en cambio, presentan ambas aspecto de misidáceos y una notable semejanza. Parecía como si los cangrejos esponja hubiesen adquirido esas larvas con aspecto de camarón a partir de los cangrejos ermitaños: pero tamaña curiosidad sin explicación constituía, para el pensamiento de la época, una imposibilidad.

¿De qué modo podía un camarón común, me pregunté, originar, por metamorfosis, dos tipos de cangrejo? Aparecieron más anomalías.



3. LOS ROTIFEROS tienen ciclos biológicos sencillos. Con todo, estos microorganismos marinos y de agua dulce pueden haber aportado una etapa larvaria al ciclo biológico de otros animales; ello explicaría la dispersión de las larvas trocóforas entre filos sin parentesco. En ese escenario, empezando a contar el tiempo evolutivo desde la parte inferior de la figura, un gusano poliqueto hibridó con un rotífero, con lo que adquirió una larva trocófora (*1*); esta parte del genoma del poliqueto pasó a formar parte de un gusano sipuncúlido en una segunda hibridación (*2*). Hibridaciones posteriores con rotíferos dotaron de larvas trocóforas a los ancestros de los moluscos actuales con aspecto de bivalvo o de caracol. Sus parientes cercanos, pulpos y calamares, carecen de larvas. Según la línea de pensamiento general, las formas larvarias surgieron con el tiempo conforme las formas juveniles y adultas de una misma especie divergieron cada vez más. Por tanto, las semejanzas entre las larvas de especies remotamente emparentadas suelen explicarse por evolución convergente; vale decir, muchos organismos desarrollarían etapas larvarias para dar respuesta a necesidades como la dispersión y la alimentación.

STEPHANIE FREESE, ADAPTADO DE UN DIAGRAMA DE SONYA E. VICKERS/*American Scientist*

Las estrellas de mar con simetría radial y los gusanos bellota con simetría bilateral poseen también larvas muy parecidas. De acuerdo con la explicación admitida, adelantada ya por Ernst Haeckel en 1866, habría un precursor común de simetría bilateral: las estrellas de mar ancestrales se habrían fijado sobre un sustrato y habrían desarrollado, poco a poco, una simetría radial más eficaz para las formas sésiles. Las larvas en natación libre, por contra, habrían retenido la simetría primitiva. Cuestioné semejante hipótesis, por inverosímil; puse también en cuarentena la afirmación sobre la imposibilidad de transferir larvas o su dotación génica. Andado el tiempo, me convencí de que la transferencia se producía mediante fecundación cruzada o hibridación.

De manera paulatina me fui percatando de que la hipótesis de la transferencia podía aplicarse a todas las larvas; además, para todas las larvas existe (o existió en algún momento) una forma adulta correspondiente: un animal que no experimenta metamorfosis. Se transfiere la totalidad del genoma de ese animal, pero el híbrido resultante utiliza sólo una parte.

La oruga y el caracol

Centrémonos en las larvas. Las que resultan más familiares para el hombre son las orugas

4. LOS EQUINODERMOS SON ANIMALES MARINOS con simetría radial. Entre ellos se incluyen las estrellas de mar, los erizos de mar y las holoturias. Aunque siempre se ha considerado que la simetría radial de los adultos surgió en respuesta a un estilo de vida sedentario, las pruebas no son concluyentes. El registro fósil aloja adultos con simetría radial. Las holoturias adultas muestran una mezcla de rasgos bilaterales y radiales; sus larvas auricularias (*izquierda*) guardan mayor parecido con las larvas tornarias de criaturas como el gusano bellota (*derecha*) que con las larvas de otros equinodermos. Williamson propone que el gusano bellota adquirió su larva mediante hibridación con un planctosferoideo ancestral; se hibridó luego con una holoturia.



de los lepidópteros (mariposas y polillas): larvas con tres pares de patas, que se extienden desde el tórax, y una cifra variable de esbozos de patas adicionales, o propatas, adheridas al abdomen. Una oruga vendría a ser una "máquina de comer" extensible, que repta pero no vuela.

Ahora bien las larvas de tipo oruga no son exclusivas de los lepidópteros. Las observamos en la mosca escorpión (mecóptero), en la avispa de la madera y la mosca de sierra (himenópteros). Las hormigas, las abejas, las avispas y otros himenópteros tienen larvas sin patas.

Si hubiera que clasificar las larvas de insectos obtendríamos un esquema independiente de la clasificación de los adultos. Aunque ese esquema no facilita la búsqueda de un precursor común, es coherente con la idea de que las larvas constituyen adquisiciones posteriores de los ciclos biológicos.

Según la teoría de la transferencia larvaria, las larvas de tipo oruga originales se transfirieron a partir de adultos semejantes a los actuales peripatos (gusanos del género *Peripatus*). Se trata de la forma adulta correspondiente a todas las larvas de tipo oruga. El peripato medra en suelos ricos en materia orgánica de la América tropical, el sur de Africa y Australia. Esos gusanos con patas pertenecen, pues, al filo Onychophora (onicóforos), separado de los insectos y las lombrices de tierra. Cuando se produjo la hibridación entre insectos y peripatos, las quimeras resultantes disfrutaron de lo mejor de ambos progenitores: una forma larvaria especializada en la alimentación y un adulto volador experto en la dispersión de los genes. Onicóforos e insectos voladores han sobrevivido a una rigurosa selección natural durante millones de años. La hibridación aportó facultades novedosas, vedadas a cada uno por separado.

Si ampliamos nuestro enfoque hacia otros tipos de larva, la organización clásica de los seres vivos se tambalea. En el filo de los moluscos (Mollusca) hallamos bivalvos, caracoles, pulpos y calamares. Los anélidos constituyen otro gran filo de gusanos segmentados; incluye a los poliquetos y las lombrices de tierra. Los miembros de esos dos grandes grupos están tan lejanamente emparentados como puedan estarlo los conejos y las mariposas.

Dentro de esos grupos, se observa una curiosa distribución de las formas larvarias. La mayoría de los bivalvos y caracoles marinos se desarrollan a partir de larvas *trocóforas*, traslúcidas, que portan una o más bandas de cilios; no comparten ningún rasgo morfológico con los adultos en los que se convertirán. Los pulpos y los calamares, también moluscos, carecen de larvas.

Numerosos gusanos poliquetos presentan larvas trocóforas que guardan semejanza con las de bivalvos y caracoles. Pero dentro del mismo filo, descubrimos las lombrices de tierra, sin larvas. Ciertos miembros de varios filos marinos menos conocidos, entre ellos algunos gusanos sipuncúlidos, presentan larvas trocóforas. La explicación que suele darse de tales semejanzas se apoya en que todos esos filos descienden de ancestros con larvas trocóforas. De acuerdo con esa línea de razonamiento, los pulpos, lombrices de tierra y algunos sipuncúlidos habrían evolucionado mediante la *pérdida* de las larvas.

La hipótesis de la transferencia larvaria implica, por tanto, que pueden aparecer larvas similares en el ciclo biológico de animales distintos y apenas emparentados. En el otro extremo, podrá haber animales estrechamente emparentados que desarrollen larvas distintas o ciclos biológicos divergentes, en el caso de que sólo algunos adquieran larvas. La hipótesis implica también la existencia de formas adultas parecidas a las larvas.

Y las hay, además de los peripatos descritos anteriormente. Por citar otro ejemplo, el filo



PETER PARKS/imagequestmarine.com/*American Scientist*

de los rotíferos, "con aspecto de rueda", comprende microorganismos marinos o de agua dulce que presentan cilios y un ciclo biológico sencillo. *Trocosphaera* corresponde a un rotífero con un estrecho parecido con las larvas trocóforas. Estamos convencidos de que las bivalvos, caracoles, gusanos poliquetos y algunos gusanos sipuncúlidos adquirieron larvas trocóforas mediante la hibridación con rotíferos. Los pulpos, calamares, lombrices de tierra y otros sipuncúlidos nunca han hibridado.

Uncida a la selección natural, la hipótesis explica la distribución de las larvas a partir de la existencia o ausencia de hibridación, así como la desaparición de larvas en especies que hibridaron en algún momento. Probablemente, algunos caracoles marinos y gusanos poliquetos, que carecen de larvas aunque guardan una estrecha relación con especies que sí las tienen, perdieron sus larvas. La división celular que se desarrolla en el huevo de esos animales sigue un patrón parecido al de las especies larvarias. En pulpos, calamares y lombrices de tierra, en cambio, la división celular difiere bastante; lo que resulta coherente con la idea de que estos animales nunca contaron con larvas.

Según la teoría del "linaje común", los rotíferos adultos corresponden a "larvas persistentes" (descendientes de formas que han madurado en estado larvario). De ser así, los genes del adulto que no se ha llegado a desarrollar persistirían integrados en el "ADN basura". La verdad es que los rotíferos cuentan con un número insignificante de genes basura.

Estrellas de los fondos marinos

Los animales que pertenecen al filo de los equinodermos gozan de simetría radial. Comprende estrellas de mar, ofiuros, comátulas, erizos de mar y holoturias (pepinos de mar). Las larvas de los equinodermos presentan una simetría distinta de la que define a los adultos. No sólo portan simetría bilateral, sino que algunas de ellas, con su mezcla de bandas ciliadas dispuestas en línea recta y atravesadas, nos recuerdan a las larvas *tornarias* de los hemicordados, el filo donde se cobijan los gusanos bellota. La explicación más aceptada de esa anomalía, propuesta por Haeckel, establece que las larvas bilaterales de equinodermos y hemicordados han evolucionado a partir de un precursor común con las larvas tornarias. Un ancestro de los equinodermos modernos habría desarrollado simetría radial en respuesta a la vida sedentaria.

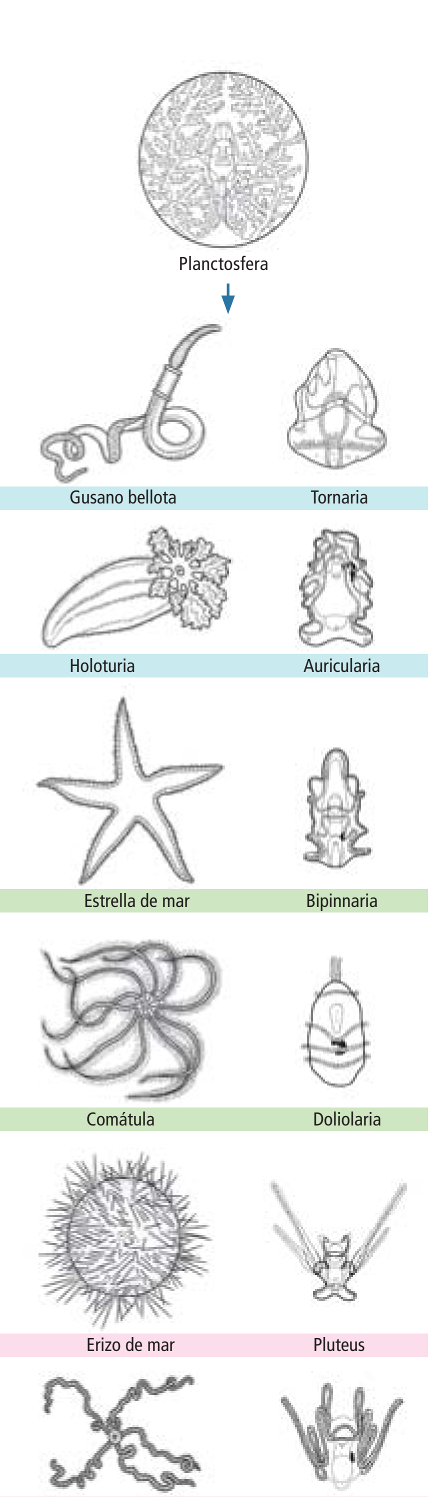
Los fósiles y larvas descritos con posterioridad a Haeckel no apoyan su teoría sobre el origen de los equinodermos. Hay en el registro fósil equinodermos adultos con simetría radial y una antigüedad de 540 millones de años, por lo menos. Algunas larvas de hemicordados parecen trocóforas, no tornarias. De las larvas equinodermas, las de holoturia son las que mayor semejanza guardan con las tornarias. Las holoturias adultas acogen una mezcla de características bilaterales y radiales.

Una interpretación haeckeliana sugiere que las holoturias constituyen los equinodermos vivos más cercanos a la forma ancestral. Mas, por paleontología sabemos que, en la filogenia de los equinodermos, las holoturias surgieron en un momento tardío. Para deshacer esa aporía, Williamson sugiere que las larvas corresponden a incorporaciones posteriores a esa rama del intrincado árbol de la vida. La forma adulta a partir de la cual evolucionaron las larvas tornarias sería entonces *Planctosphaera pelagica*, el único planctosferoideo conocido. Este animal planctónico, esférico, cuyo diámetro llega a alcanzar 25 milímetros, se impulsa por medio de bandas ciliadas atravesadas.

Aunque hemicordado por su parecido con una larva tornaria, se considera un miembro adulto del grupo que dio lugar a las larvas tornarias mediante una transferencia híbrida. Es decir, un antepasado de *Planctosphaera* hibridó con un gusano bellota para generar un gusano bellota con una larva tornaria. Ese tipo de larva se extendió luego, vía fecundación cruzada entre un gusano bellota y una holoturia. Hibridaciones posteriores entre holoturias y estrellas de mar, estrellas de mar y erizos de mar, y erizos de mar y ofiuros explicarían las formas larvarias que presentan estos equinodermos.

Los autores

Donald I. Williamson enseñó, hasta su retiro en 1997, biología marina en la Universidad de Liverpool. Especializado en plancton marino, la mayoría de sus publicaciones versan sobre larvas de crustáceos. **Sonya E. Vickers** es profesora de secundaria.



5. LAS DESIGUALDADES ENTRE ADULTOS (*izquierda*) Y LARVAS (*derecha*) del gusano bellota (un hemicordado) y los equinodermos son notables. Todas estas larvas pueden haber sido adquiridas mediante una serie de hibridaciones que comenzó cuando el gusano bellota incorporó un planctosferoideo ancestral (*arriba*). (Se ha reducido el tamaño de los adultos y aumentado el de las larvas.)

STEPHANIE FREESE, DE BARNES Y COL. BLACKWELL SCIENCE, OXFORD, 2001 (*Planctosferoideo y Tornaria*); DONALD WILLIAMSON, 2003 (*resto de ilustraciones*), CON PERMISO DE SPRINGER SCIENCE AND BUSINESS MEDIA/*American Scientist*

No ha podido establecerse una relación entre las larvas doliolarias de las comátulas (un grupo de equinodermos) y un planctosferoideo. Pero no se necesitan tales nexos en transferencia larvaria; de acuerdo con ésta, la dispersión evolutiva de las larvas tornarias debe ser independiente de la evolución de los equinodermos adultos.

Comprobación de la hipótesis

Como indicó Michael W. Hart, de la Universidad Simon Fraser, en 1996, la hipótesis de la transferencia larvaria resulta tan heterodoxa que se daría por satisfecha con un ejemplo que la avalara. A modo de prueba, Williamson diseñó un experimento encaminado a inducir la hibridación en el laboratorio. En 1990, fecundó huevos de *Ascidia mentula* (una ascidia del subfilo de los urocordados) con esperma de erizo de mar (*Echinus esculentus*), un equinodermo. Williamson publicó los resultados en 1992, en el libro *Larvae and Evolution: Toward a New Zoology*.

¿Qué ocurrió? Aunque, como era de suponer, los huevos de *Ascidia* no se dividieron en la mayoría de los experimentos (la hibridación constituye un fenómeno muy raro), hubo uno en que eclosionaron más de 3000 huevos y dieron lugar a larvas *pluteus*, la forma larvaria típica del erizo de mar paterno, con sus esbeltos brazos sujetados por filamentos calcáreos. Más del 90 por ciento reabsorbieron sus brazos para convertirse en esferoides, que vivieron más de un mes, aunque no avanzaron en su desarrollo. El otro 7-9 por ciento de las larvas pluteus sufrieron metamorfosis para convertirse en erizos de mar, cuatro de los cuales sobrevivieron más de un año. Dos de los supervivientes presentaban simetría radial pentamérica, típica del erizo de mar; los otros dos desplegaban una simetría tetramérica. Los tres de mayor tamaño sobrevivieron durante más de cuatro años, hasta que se estropeó el sistema de circulación de agua marina del laboratorio; todos produjeron huevos durante las etapas avanzadas de su vida.

Hart propuso que si los supervivientes eran híbridos, un análisis genético detectaría ADN mitocondrial procedente de la madre, la ascidia *A. mentula*, así como ADN nuclear aportado por ambos progenitores. Tres años después de la muerte de las larvas, extrajo ADN de los pies ambulacrales congelados de los tres erizos supervivientes. Lo comparó con el ADN de individuos silvestres de las dos especies implicadas.

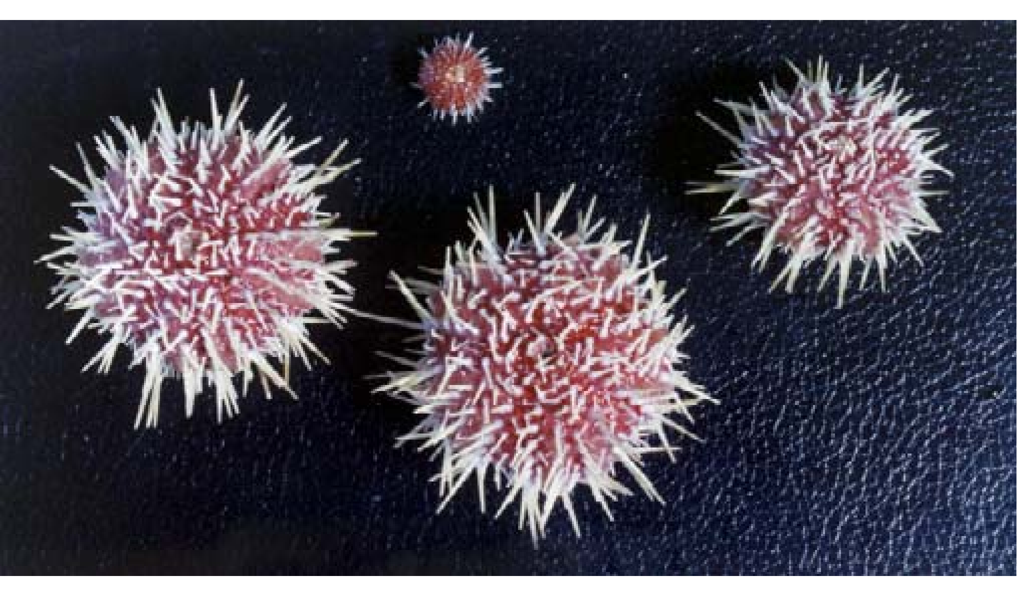
La comparación de las secuencias alineadas de nucleótidos así como de un fragmento del gen nuclear del ARN ribosómico de 28S no demostró la presencia de material genético de la ascidia en los supervivientes del experimento. Hart supuso que, pese a las precauciones adoptadas, el experimento podría haberse contaminado con huevos de erizo de mar. Junto con Richard Strathmann, de la Universidad de Washington, planteó la posibilidad de que en la población de erizos utilizada hubieran hermafroditas, no obstante su conocida escasez. Williamson rechaza de plano semejante razonamiento en *The Origins of Larvae*, publicado en 2003.

Aunque Williamson fracasó en su búsqueda de ADN de ascidia en las muestras tisulares, la biología molecular empieza a aportar datos que respaldan la hipótesis de la transferencia larvaria. Ernest W. MacBride, que en 1914 abordó el problema de la morfología de los equinodermos, reconoció una secuencia de aparición de larvas en el registro evolutivo: empezando con las tornarias (gusanos bellota), siguiendo con las auricularias (holoturias), bipinnarias (estrella de mar) y, por último, las pluteus (erizos de mar y ofiuros). Se ha descubierto esa misma secuencia (coherente con la transferencia larvaria) en la distribución de un gen ribosómico.

Los genes de ARN ribosómico constituyen el material genético que mejor se ha conservado en los reinos biológicos. Sirven para construir "filogenias moleculares" que dibujan los linajes y estiman la velocidad con que divergen las nuevas especies. En ocasiones, los diagramas resultantes difieren de los esquemas basados en otro tipo de observaciones, como los fósiles, los ciclos biológicos o la morfología de los organismos adultos.

Michael Syvanen, de la Universidad de California en Davis, se viene dedicando desde hace decenios al análisis de patrones a gran escala del gen para el ARN ribosómico de 18S. Los genéticos han depositado en una base de datos unas 4500 secuencias del ARN de 18S procedentes de animales pluricelulares. Syvanen ha compartido con Williamson algunos de los patrones filogenéticos descubiertos durante su análisis. Un cladograma, o diagrama filogenético, derivado de las secuencias del ARN de 18S muestra la misma secuencia temporal de aparición que halló MacBride: gusano bellota, holoturia, estrella de mar, erizo de mar. Aunque ese orden de aparición es el mismo que muestran las larvas de tales grupos, no guarda ninguna relación con la historia evolutiva de los *adultos* obtenida a partir de pruebas de otra naturaleza.

La hipótesis de la transferencia larvaria ofrece una explicación simple para ese patrón: el ARN ribosómico de 18S se habría transferido varias veces entre taxones. En el caso de hemicordados y equinodermos, parece haberse transferido al





6. HUEVOS DE UNA ASCIDIA se fecundaron, en el laboratorio, (*Ascidia mentula*) con esperma de un erizo de mar (*Echinus esculentus*). Esta fotografía, de 1993, muestra los erizos marinos de tres años de edad que sobrevivieron. Dos de ellos presentan una simetría radial pentámera, típica de un erizo de mar; los otros dos, en cambio, muestran una simetría tetrámera. A la derecha, una larva pluteus procedente del experimento, fotografiada al cabo de un mes.

CORTESIA DE DONALD I. WILLIAMSON, CON PERMISO DE SPRINGER SCIENCE AND BUSINESS MEDIA/*American Scientist*

tiempo que los genes que especifican las formas larvarias. La hibridación constituye el método más probable para la transferencia simultánea de los genes ribosómicos en cuestión y otros genes nucleares. Aunque la hipótesis se desarrolló a partir de la morfología animal, resulta compatible con las pruebas moleculares.

El análisis de ARN de Syvanen proporciona, cabe agregar, datos génicos de los paralelismos que existen entre los principales linajes de organismos superiores. Los patrones paralelos suelen atribuirse a un fenómeno de evolución convergente: delfines y peces, por ejemplo, poseen una estructura corporal adecuada para la natación. Pero el trabajo de Syvanen sugiere que las transferencias génicas se producen a través de grandes distancias taxonómicas en plantas y animales pluricelulares. La transferencia larvaria constituye, probablemente, uno de los varios mecanismos de fusión genómica que están aún por descubrir.

Un huevo, dos organismos

Si desmontamos los diagramas filogenéticos y los contemplamos desde el punto de vista de una larva, hallamos explicación para otras anomalías del desarrollo de los equinodermos. Los ofiuros y los erizos de mar, muy distintos en su etapa adulta, comparten la singular morfología de la larva pluteus. ¿Por qué larvas semejantes generan adultos diferentes? La teoría de la transferencia larvaria propone que la larva pluteus básica apareció sólo una vez durante la evolución, en un erizo de mar, y fue conservada por los descendientes de este erizo. Posteriormente, un precursor de la mayoría de los ofiuros actuales adquirió una larva pluteus mediante hibridación con un erizo de mar.

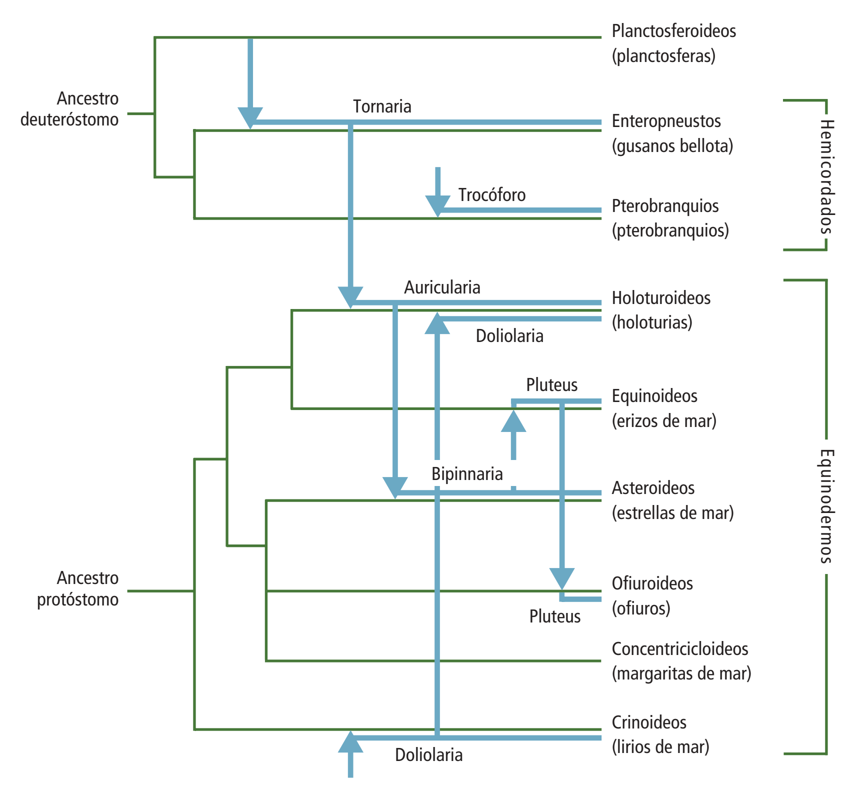
Uno de los miembros de ese grupo, el ofiuro de Kirk, se desarrolla directamente a partir del huevo fecundado, sin trazas de larva bilateral. El blastoporo se convierte en una boca; se trata, por tanto, de un *protóstomo*. Todas las larvas de equinodermos pertenecen a una categoría que presenta un desarrollo distinto, los *deuteróstomos*, en los que la boca corresponde a una nueva abertura; varios equinodermos han perdido su desarrollo larvario deuteróstomo. Si el ofiuro de Kirk perdió su larva, se vería obligado a adoptar un patrón de división celular radicalmente distinto en el embrión. Sin embargo, creemos que si el ofiuro de Kirk no tiene larvas es porque ninguno de sus ancestros hibridó con un erizo de mar. El erizo acorazonado *Abatus cordatus* y las tres especies conocidas de margaritas de mar tampoco tienen larvas y muestran un desarrollo protóstomo. Tal sería, intuimos, el método ancestral de desarrollo en equinodermos. La deuterostomía debió surgir con la transferencia larvaria.

Los erizos *Lytechinus variegatus* y *L. verruculatus*, pese a compartir género, se desarrollan de larvas pluteus muy dispares. Este y otros casos como ese son difíciles de comprender si consideramos que las larvas y los adultos correspondientes evolucionaron a partir de un precursor común. Pero se explican en cuanto aceptamos que las larvas se adquirieron por hibridación y que los dos adultos similares hibridaron con especies distintas en una época reciente.

Quizá la anomalía más extraña corresponda a la estrella de mar *Luidia sarsi*. Como en otras estrellas de mar, el huevo fecundado se desarrolla para dar lugar a una larva bilateral en cuyo interior se encuentra un pequeño espécimen juvenil con simetría radial; el juvenil migra luego hacia el exterior de la larva. En la mayoría de las estrellas de mar, las larvas caen al fondo del mar y degeneran, dejando que el individuo juvenil se aleje libremente. En *L. sarsi* el juvenil se suelta de la larva,

que sigue nadando; ambos siguen una vida independiente durante meses.

Esos dos organismos tan distintos corresponden al mismo individuo: han eclosionado del mismo huevo fecundado. ¿Cómo es posible que un organismo se divida para generar dos animales dispares, los dos con el mismo genoma? Según la hipótesis de la transferencia larvaria, la coexistencia en *Luidia sarsi* de la larva nadadora y la estrella de mar reptante se explica si atendemos a la fusión de los genomas de dos animales que hibridaron para producir un animal con una larva. Con todo, los dos genomas han conservado un grado notable de independencia; se expresan juntos durante el desarrollo. Se trata de una metamorfosis solapada, un fenómeno conocido también en otros equinodermos, en doliólidos y en poliquetos. Si bien el solapamiento en esas especies no dura tanto como en *Luidia sarsi*. Dado que la larva y el juvenil coexisten a la par, la larva no "se desarrolla" para generar el juvenil, como cabría esperar si adultos y larvas hubiesen evolucionado de un ancestro común.



7. NO SE HALLARON SECUENCIAS GENICAS que indicasen, en el experimento descrito en la figura 6, la presencia del ADN de la ascidia. Sin embargo, existen pruebas moleculares más generales que apoyan una secuencia de transferencias larvarias entre especies de hemicordados y equinodermos. Esas pruebas se han obtenido a partir del análisis de patrones a gran escala del ARN ribosómico de 18S. Realizado por Michael Syvanen, el análisis nos permite seguir el rastro de los linajes y estimar la divergencia. El cladograma resultante, o árbol hipotético de parentescos, indica que las especies aparecieron en el mismo orden que se deduciría a partir de las transferencias larvarias propuestas por Williamson (*flechas azules*). Ello se explicaría si el ARN ribosómico de 18S se hubiese transferido al propio tiempo que los genes de la forma larvaria. De forma más general, el trabajo de Syvanen sugiere que, en los animales superiores se transfieren genes a través de largas distancias taxonómicas. Protóstomos y deuteróstomos se diferencian por su patrón de desarrollo: en los primeros, el blastoporo de la larva se convierte en la boca del animal; en los segundos, la boca se forma a partir de una nueva abertura.

STEPHANIE FREESE, ADAPTADO DE DONALD I. WILLIAMSON/*American Scientist*

Otras teorías

La hipótesis de la transferencia larvaria no es la única teoría que se baraja en los debates sobre biología evolutiva del desarrollo. Esa nueva frontera *evo-devo* (de "evolutionary developmental biology") se encuentra en plena efervescencia.

La abundante bibliografía sobre la evolución de los animales con larvas da por supuesto que un organismo comenzó careciendo de un estadio larvario y que, posteriormente, en el transcurso de la evolución, desarrolló uno en aras de la supervivencia y la propagación. Por botón de muestra, el nemátodo *Caenorhabditis elegans* crea una estructura corporal ligeramente peculiar si se somete a estrés durante su desarrollo. Cuando desaparece la causa de estrés, revierte a su estructura corporal normal. Se han localizado los genes responsables de esa estructura divergente. El equipo dirigido por Birgit Gerisch, del Instituto Max Planck de Genética Molecular en Berlín, junto con John Wang y Stuart K. Kim, de la Universidad de Stanford, han avanzado la hipótesis de que los continuos cambios ambientales podrían determinar que las dos estructuras corporales diverjan tanto, que una de ellas acabe por convertirse en la larva que, más tarde, se desarrollará para originar la estructura corporal adulta. Semejante plasticidad nos recuerda la notable flexibilidad de los genomas animales y, por ende, su capacidad de generar diversidad.

La explicación más frecuente para las semejanzas entre larvas de filos tan dispares como los moluscos y los anélidos se esconde en la evolución convergente. Dos larvas parecidas de grupos diversos deben esa semejanza a un fenómeno común: han de acometer los mismos retos. No existe la forma planctónica perfecta hacia la que converger. El plancton marino adopta una diversidad de formas sorprendente: todas ellas, en apariencia, adaptadas al entorno. Cabe preguntarse si *Luidia sarsi*, la estrellita de mar que se separa de su larva y ambos siguen viviendo, encaja en el paradigma del organismo que desarrolla el estado larvario. A primera vista se trataría de una paternidad doble.

Otra teoría sostiene que las larvas aparecieron primero. Se la conoce como la hipótesis del "precursor larvariforme", pues no acepta que las larvas se adquieran por hibridación. Esa propuesta, avanzada por Kevin J. Peterson, Eric H. Davidson y sus colaboradores, del Instituto de Tecnología de California, respon-

día al hecho siguiente: las larvas constan de células exclusivamente larvarias (con capacidad limitada para dividirse e incapaces de diferenciarse) y de regiones bien diferenciadas que contienen células "apartadas" que darán lugar al rudimento del cuerpo del adulto. Mediante un "desarrollo indirecto" (un ciclo biológico que se interrumpe para pasar por una etapa larvaria, la larva proporciona un sistema de soporte vital para el esbozo, que se desarrolla en el interior de la larva o como si fuese un apéndice de ella. Tras la metamorfosis se pierden las estructuras larvarias.

A partir del examen de los patrones de las células "apartadas" y de los genes en varios filos, el grupo de Peterson y Davidson llegó, en 1997, a la conclusión de que las formas larvarias de diversos filos eran homólogas; vale decir, guardaban un estrecho parentesco desde el punto de vista evolutivo. Representaban, además, programas reguladores del desarrollo, que usan todavía sus descendientes modernos. Aplicando la lógica evolutiva, ese análisis sugiere que las formas larvarias pertenecieron a una estirpe primitiva de erizos, sanguijuelas e insectos. En 2000, Peterson y Davidson propusieron que la evolución de la simetría bilateral debe haber pasado por "una amplia etapa previa en la que existían micrometazoos bilaterales con categoría de organismo similar a las larvas primarias de los animales bilaterales modernos".

En 2003, el grupo encabezado por Belinda J. Sly, de la Universidad de Indiana, lanzó una crítica mordaz contra la hipótesis del "ancestro larvariforme". Presentaron datos que demostraban que las larvas surgieron en breves lapsos de tiempo evolutivo. En el escenario planteado por Sly, las larvas evolucionarían mediante la incorporación de genes del genoma del adulto para que operasen en la larva. Muchos de los patrones que apoyan la hipótesis de Sly —observados en los genomas y en el registro evolutivo— se explicarían mediante la transferencia larvaria.

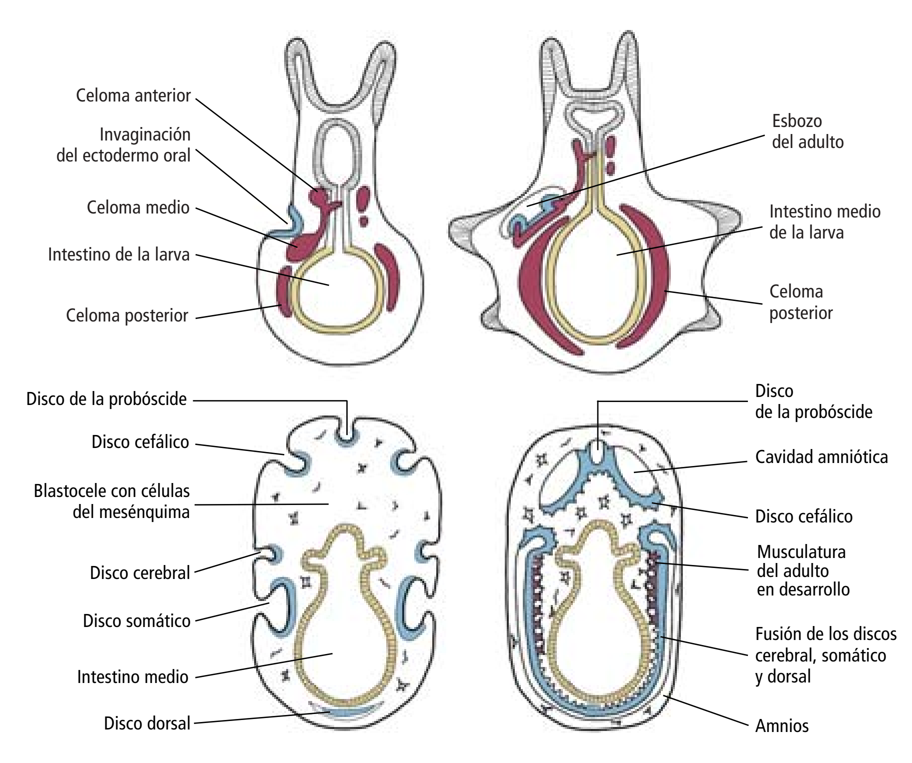
El equipo de Peterson elaboró la hipótesis de las células "apartadas", basándose en el desarrollo de los equinodermos. Williamson ofrece una explicación distinta para la metamorfosis de los equinodermos. Las células en cuestión corresponden a células mesodérmicas no diferenciadas (células madre), que recubren los *sacos celómicos* (cavidades corporales) en las larvas de los equinodermos. La hipótesis de la transferencia larvaria las identifica como un legado adquirido junto con las larvas tornarias, transferidas desde un gusano bellota mediante hibridación.

Al carecer de larvas, los equinodermos ancestrales habrían extendido sus cinco brazos a partir de la *gástrula*, una estructura formada durante una etapa intermedia del desarrollo embrionario, tal y como hace hoy el ofiuro de Kirk. Los equinodermos modernos con larvas sustituyen un saco celómico larvario de tamaño apropiado por una gástrula. Las células a partir de las cuales se desarrolla un equinodermo con simetría radial no fueron células "apartadas", sino el resultado de una hibridación aleatoria entre un gusano bellota y un equinodermo.

Para distinguir entre tales enfoques y las hipótesis que implican hibridación se podría comparar las secuencias de ADN de las formas larvaria y adulta. Las larvas similares de adultos diferentes poseerían, hemos de presumir, genes similares que habrían heredado de sus ancestros comunes durante la hibridación.

Por otro lado, adultos estrechamente emparentados y con larvas distintas mostrarían desigualdades en los genes expresados durante la etapa larvaria, si es que realmente arrancan de fuentes distintas hibridadas. La tarea no es sencilla. El panorama se complica con la creación de quimeras en serie, ya que la transferencia larvaria sugiere que muchos de los animales actuales no son el resultado de una sola hibridación sino de muchas, como se ha visto en equinodermos.

Si el árbol de la vida no fuese un árbol, sino una maraña enrevesada de relaciones interconectadas, la prueba del ADN resultaría tan confusa para los evolucionistas como los datos obtenidos a partir del ARN ribosómico de 18S. Pero disponemos ya de potentes herra-



8. LAS CELULAS "APARTADAS" centran una de las propuestas recientes sobre la evolución larvaria. Kevin J. Peterson, Eric H. Davidson y sus colaboradores afirman que las larvas se componen de células exclusivamente "larvarias" y de regiones formadas por otras células distintas (las células "apartadas"), facultadas para diferenciarse y que generarán el esbozo del cuerpo del adulto. Los diagramas que aparecen en la figura corresponden a secciones transversales de una larva de erizo de mar (*arriba*) y de un gusano nemertino (*abajo*); se muestran en color las regiones que contienen células "apartadas". Peterson sugiere que los patrones de células "apartadas" y los genes relacionados respaldan la idea de que las larvas son primigenias y que forman parte de los ancestros de multitud de filos. Williamson ofrece otra interpretación de las células: en el caso del erizo de mar, constituirían un legado de la adquisición de larvas de tipo tornaria.

STEPHANIE FREESE, ADAPTADO DE PETERSON ET AL. 1997, CON PERMISO DE WILEY-LISS/JOHN WILEY & SONS/*American Scientist*

mientas para abordar esas cuestiones. En 2006 terminó la secuenciación del genoma del erizo de mar púrpura. Había transcurrido un siglo desde que Theodor Boveri determinase, apoyado en su investigación sobre huevos del erizo de mar, que el desarrollo embrionario normal requería que cada célula portara una dotación cromosómica completa. Esperemos que no transcurra otro siglo hasta el descubrimiento del origen de las larvas de tan extraordinario equinodermo.

Problemas

Lo mismo que las hipótesis anteriores, que han generado debates acalorados, la transferencia larvaria plantea múltiples interrogantes que aguardan respuesta. Strathmann ha señalado las graves dificultades que impiden la hibridación: sobre todo, la unión huevo-esperma y la influencia del citoplasma del huevo sobre la expresión génica durante las etapas precoces del desarrollo. Los mecanismos de fecundación y embriogénesis difieren de un organismo a otro; tampoco los genomas de grupos taxonómicos distintos animales se muestran proclives a la fusión.

Tales barreras no tienen por qué ser infranqueables, aunque pudieran explicar la imponente dificultad de conseguir en el laboratorio una hibridación, con la posterior supervivencia hasta la etapa adulta. No parece probable que sea frecuente la fecundación aleatoria entre animales distintos. Pero se ha dado. En ocasiones, huevos no fecundados de insectos resultan inseminados por el esperma de otra especie. De forma análoga, la fecundación de los onicóforos es externa. Los animales marinos suelen liberar los huevos y el esperma al mar abierto, donde la fecundación entre especies distintas parece más probable. La mayoría de las pruebas en favor de la hipótesis de la transferencia larvaria procede de animales marinos; no resultaría difícil completar otra lista larga de dificultades para las teorías del "linaje común". Como escribieron Brian K. Hall y Marvalee H. Wake en la introducción de su libro de 1999 sobre formas larvarias:

> A pesar de toda la investigación realizada, el definir en qué consista una larva, entender qué sea la metamorfosis y despejar otras cuestiones básicas siguen intrigando hoy a naturalistas, zoólogos, biólogos marinos y biólogos evolucionistas igual que hace más de un siglo y medio.

Implicaciones de la transferencia larvaria

Si, como propone Williamson, las larvas fueron adquisiciones tardías del ciclo biológico, los primeros animales no pueden haber tenido larvas. Cuando se produjo una hibridación con éxito, la quimera resultante poseía las ventajas que cada progenitor había adquirido a lo largo de años de selección natural, junto con las ventajas que ofrece el acoplamiento de una etapa temprana centrada en la alimentación con una etapa posterior dedicada a la reproducción. Esas ventajas le facultaban para crear muchos más animales de su mismo tipo, la diversidad que observamos ya entre los animales con larva.

De una manera episódica prosperaron hibridaciones entre adultos en el mar, donde los huevos y el esperma se dispersan al azar. El fenómeno no se limita a un pasado remoto. Las ofiuros del mismo género que presentan formas larvarias distintas nos hablan de una hibridación reciente. De donde se desprende que pudieran no compartir un mismo ancestro parientes cercanos. El entramado —no el árbol— de la vida presenta ramas fusionadas en tiempos remotos en las que están involucrados multitud de filos y fusiones que han ocurrido en fecha más reciente y que separan a especies del mismo género.

La transferencia larvaria explica el modo en que se originaron las larvas, así como la distribución de los tipos de larva en el reino animal. La distribución es independiente de la filogenia de los adultos. Por tanto, los árboles filogenéticos que se han venido admitiendo desde comienzos del siglo xx adolecen de errores fatales. Dado que las larvas fueron adquisiciones posteriores del ciclo biológico, desde esta nueva perspectiva, los moluscos, anélidos y otros filos trocóforos no evolucionaron a partir de un ancestro común con larvas trocóforas; en pura analogía, tampoco equinodermos y cordados surgieron a partir de un ancestro común con larvas tornarias.

Ahora podemos responder a la cuestión planteada por el equipo de Sly. ¿Qué fue primero, la larva o el adulto? Estamos convencidos de que las larvas corresponden a incorporaciones posteriores al ciclo biológico. Hubo moluscos y equinodermos antes de que ambos adquiriesen una larva. Sin embargo, los rasgos larvarios básicos deben haber evolucionado mucho antes de que existiesen los animales con larva, según señaló Margulis al afirmar que "las funciones que desempeñan hoy los orgánulos celulares aparecieron mucho antes de que existiesen las células eucariotas". En el caso de las larvas, hubo rotíferos antes de que moluscos y anélidos adquiriesen larvas trocóforas. Los rotíferos, los planctosferoideos y los onicóforos no corresponden a larvas persistentes; antes bien, fueron el origen de las larvas adquiridas por otros organismos.

Bibliografía complementaria

WHO CAME FIRST — LARVAE OR ADULTS? ORIGINS OF BILATERIAN METAZOAN LARVAE. B. J. Sly, M. S. Snoke y R. A. Raff en *International Journal of Developmental Biology*, vol. 47, págs. 623-632; 2003.

GLOBAL ANALYSIS OF DAUER GENE EXPRESSION IN *CAENORAHBDITIS ELEGANS*. J. Wang y S. K. Kim en *Development*, vol. 130, págs. 1621-1634; 2003.

THE ORIGINS OF LARVAE. D. I. Williamson. Kluwer; Dordrecht, 2003.

HYBRIDIZATION IN THE EVOLUTION OF ANIMAL FORM AND LIFE-CYCLE. D. I. Williamson en *Zoological Journal of the Linnean Society*, vol. 148, págs. 585-602; 2006.

THE ORIGINS OF CRUSTACEAN LARVAE. D. I. Williamson en *Treatise on Zoology, The Crustacea*, vol. 2, dirigido por J. Forest y J. C. Vaupel Klein, págs. 461-482. Brill; Leiden, 2006.

Estrellas masivas

Las mayores estrellas, y más luminosas, tienen una vida corta con final violento. Mucho se ha descubierto acerca de estos motores de la evolución galáctica, de sus vientos, su composición y su capacidad ionizadora

Artemio Herrero

CONCEPTOS BASICOS

- Las estrellas de mayor luminosidad y masa, decenas de veces mayor que la del Sol, son astros convulsos, azules, de existencia breve, que van arrojando al exterior grandes cantidades de materia.
- Esos vientos estelares repercuten en la estructura y evolución de las estrellas que los emiten (la masa es la propiedad fundamental de una estrella). Así, una estrella de las llamadas Wolf-Rayet llega a perder un 90 % de su masa.
- Las estrellas masivas ionizan su entorno con la radiación ultravioleta que emiten.
- Suelen nacer agrupadas en cúmulos. Muchas de estas regiones de intensa formación estelar se ocultan tras nubes de gas y polvo; sólo se puede descubrirlas gracias a la radiación infrarroja.

A las estrellas que nacen con más de alrededor de ocho masas solares se las llama "masivas". Una masa tan elevada las condena irremisiblemente a un estallido de supernova tras unos pocos millones de años. Para entonces, han sintetizado en su interior una cantidad ingente de elementos pesados. En su mayor parte los expulsarán al exterior, cuya composición química quedará así modificada.

Esas estrellas poderosas son, pues, auténticos motores de la evolución de las galaxias y el universo. Aquí nos ocuparemos preferentemente de las que tienen más de veinte masas solares. Sus fuertes vientos y campos de radiación inyectan, a lo largo de su evolución, enormes cantidades de energía mecánica y radiativa en el medio que las rodea, ionizándolo, calentándolo y acelerándolo. Su vida es tan breve, que su mera presencia denuncia un origen reciente. Resultan así excelentes trazadores de las propiedades del medio circundante y de la formación estelar, sea en los brazos espirales de galaxias semejantes a la Vía Láctea o en brotes de intensa formación de estrellas.

Espectros

Los espectros de este tipo de estrellas ofrecen abundante información. Constan de un gran número de líneas de diferentes elementos químicos: H, He, C, N, O, Si, Mg y Fe, entre otros. Las estrellas se clasifican según su tipo espectral, definido por características específicas que unos espectros muestran y otros no. Esas características, a su vez, guardan relación con la temperatura de la superficie de la estrella. El tipo espectral O se distingue, en parte, por incluir líneas emitidas o absorbidas por el helio ionizado. Sólo las estrellas más calientes pueden ionizar el helio. La superficie de las estrellas O está a más de 30.000 K de temperatura y es de color azulado.

Junto a la letra que nombra el tipo espectral —O, B, A, F, G, K y M, y los recientes tipos L y T, en orden decreciente de temperatura—, se anotan a continuación un número arábigo entre 0 y 9 —que subdivide el rango de temperaturas dentro de ese tipo espectral de mayor a menor— y un número romano, entre I y V, indicativo de la luminosidad de la estrella, que no sólo depende de la temperatura de la superficie, sino también de su tamaño. Determinada la temperatura por el tipo y subtipo espectrales, el número romano revela el tamaño de la estrella, de supergigante (I) a enana (V).

La calificación de "enana" no se refiere a un tamaño determinado; de hecho, una enana O es mayor que una enana G y ésta, a su vez, mayor que una enana blanca. Excepto en el caso de las enanas blancas, señala que la estrella se encuentra en una fase de su existencia que corresponde a su presencia en la "secuencia principal". En el diagrama de Hertzsprung-Russell, que representa la luminosidad de las estrellas en función de su temperatura o tipo espectral, la secuencia principal forma una banda oblicua donde se encuentran las estrellas hasta que agotan el hidrógeno de su núcleo. Tras ello, se convierten en gigantes o supergigantes, y aparecen en el diagrama fuera de esa banda oblicua (*véase el recuadro* "El diagrama



1. CON ESTA IMAGEN DE LA NEBULOSA CARINA, compuesta por 48 tomas, se celebró el 17 aniversario del telescopio espacial Hubble. Su agitado aspecto está generado por los flujos de masa y radiación ultravioleta de las estrellas supergigantes que se encuentran en su seno. Cerca del borde izquierdo aparece Eta Carinae, una de las estrellas de mayor masa de la Vía Láctea, rodeada por dos brillantes lóbulos de gas y polvo simétricos, creados en una explosión de hace sólo 150 años. Parece que Eta Carinae se encuentra en una fase avanzada de su existencia.

NASA, ESA, N. SMITH, *Universidad de California en Berkeley* Y THE HUBBLE HERITAGE TEAM, STScI/AURA

de Hertzsprung-Russell"). Una estrella de más de veinte masas solares (20 $M_\odot$) sólo pasa unos millones de años en la secuencia principal, mientras que el Sol estará en ella durante unos diez mil millones de años en total.

La masa de una estrella se determina por sus interacciones gravitatorias. Así, el estudio de sistemas binarios ha permitido determinar masas de hasta 80 veces la del Sol, las más altas que conocemos de manera fiable. Cuando no es posible, se recurre a modelos teóricos. Había discrepancias de más de un factor 2 entre los modelos que se basan en la estructura interna de las estrellas y los que reproducen la atmósfera. Los modelos más recientes han enfriado los primeros y calentado los segundos; hay ahora concordancia dentro de cierto intervalo de error, excesivo todavía, pero tolerable.

El viento estelar

El lanzamiento de cohetes y satélites dotados de instrumentos de observación más allá de la atmósfera terrestre ha permitido descubrimientos importantes para la astrofísica. El satélite *Copernicus*, que observaba los rayos ultravioletas que la atmósfera terrestre bloquea, confirmó lo que ya se sospechaba a partir de otros indicios: todas las estrellas masivas presentan claros signos de estar lanzando cantidades ingentes de materia al espacio, fenómeno conocido como *pérdida de masa* o *viento estelar*.

No sólo hemos de considerar la cantidad de materia lanzada al espacio, sino también la velocidad con que es expulsada. Una supergigante de tipo espectral O7, por ejemplo, manda al espacio del orden de 5×10^{-6} $M_\odot$ por año, aceleradas hasta una velocidad de unos 2000 km s^{-1}. Comparados con estos números, los de nuestro Sol son modestos: aproximadamente 10^{-14} $M_\odot$ por año y 400 km s^{-1}. La estrella supergigante acelera su materia a velocidades cercanas a las que adquiere el material expulsado por las supernovas, que alcanza unos 10.000 km s^{-1} en un instante. Pero nuestra supergigante mantiene su viento estelar durante millones de años, en diferentes etapas de su evolución (incluido un final como supernova).

El campo gravitatorio, muy poderoso en las estrellas masivas, se opone a ese movimiento. Para que se produzca la pérdida de masa, el gas de la atmósfera estelar debe ser acelerado a velocidades superiores a la velocidad de escape de la estrella (cientos de km s^{-1}). El viento estelar de las estrellas masivas requiere, pues, grandes cantidades de energía. ¿De dónde proceden?

La pérdida de masa de las estrellas masivas se debe a la presión de la radiación. Los átomos de la atmósfera de la estrella absorben los fotones. Se producen así líneas espectrales características de cada elemento. Sin embargo, los fotones no sólo transportan energía, sino también cantidad de movimiento, que igualmente debe conservarse; por lo tanto, en la absorción se transfiere de los fotones a los átomos. La aplicación de la segunda ley de Newton nos dice que el cambio de la cantidad de movimiento produce una aceleración en los átomos en la dirección del fotón incidente. Puesto que el campo de radiación de la atmósfera estelar se dirige fundamentalmente hacia fuera, el resultado neto es una aceleración del gas hacia el exterior. Si el campo es muy intenso, como en las estrellas masivas, la aceleración puede llegar a superar la de la gravedad; en consecuencia, el material escapará de la estrella. A partir de la fotosfera estelar, la

velocidad aumenta de manera progresiva hasta que, a grandes distancias de la estrella, la densidad de partículas y fotones es tan baja, que ya no se produce más aceleración; el material alcanza su velocidad final, llamada velocidad terminal del viento estelar, que puede superar los 3000 km/s.

El efecto es tanto mayor cuantas más líneas espectrales haya. Su número depende no sólo de las proporciones en que estén presentes los elementos químicos (o, como diremos en adelante, sus “abundancias”), que definen la “metalicidad” de la estrella, sino también de la estructura atómica de éstos. Cuanto más compleja sea, más líneas espectrales producirá. Los átomos de carbono (C) y oxígeno (O) son importantes por sus abundancias, muy altas, pero la pérdida de masa se halla dominada por átomos del grupo del hierro (Fe), con su compleja estructura atómica y una abundancia también considerable. Otro factor que influye es el número de fotones que pueden absorberse. Cuantos más fotones haya, mayor será el efecto. Así pues, el momento lineal adquirido por el gas, que es el producto de la tasa de pérdida de masa por la velocidad terminal, crece con la luminosidad y la metalicidad de la estrella. Esta relación entre el momento del viento, la metalicidad y la luminosidad constituye la predicción fundamental de la teoría de los vientos impulsados por radiación que acabamos de exponer.

La influencia de la pérdida de masa en la vida de la estrella resulta determinante. Una estrella nacida con 40 masas solares habrá perdido cerca de cinco, por el viento estelar, al final de los cuatro millones de años de su paso por la secuencia principal. Esa pérdida de masa multiplica por mil millones la producida por generación de energía nuclear durante el mismo tiempo. No se trata de ningún efecto lineal; una estrella de 120 masas solares puede perder 45 de ellas en sólo los dos millones y medio de años que pasa en la secuencia principal.

¿Por qué importa tanto la pérdida de masa? Hay dos razones fundamentales. La primera es que afecta directamente a la evolución de la estrella; la segunda, que afecta a la evolución de la galaxia donde se encuentra.

Una cuestión de masa

La masa inicial de una estrella determina su estructura en el momento de nacer y su evolución posterior. En ese enunciado se compendia nuestro conocimiento sobre la estructura y evolución de las estrellas. Otras propiedades, como la composición química y la velocidad de rotación (y quizás el campo magnético), influyen en la estructura y en la evolución de

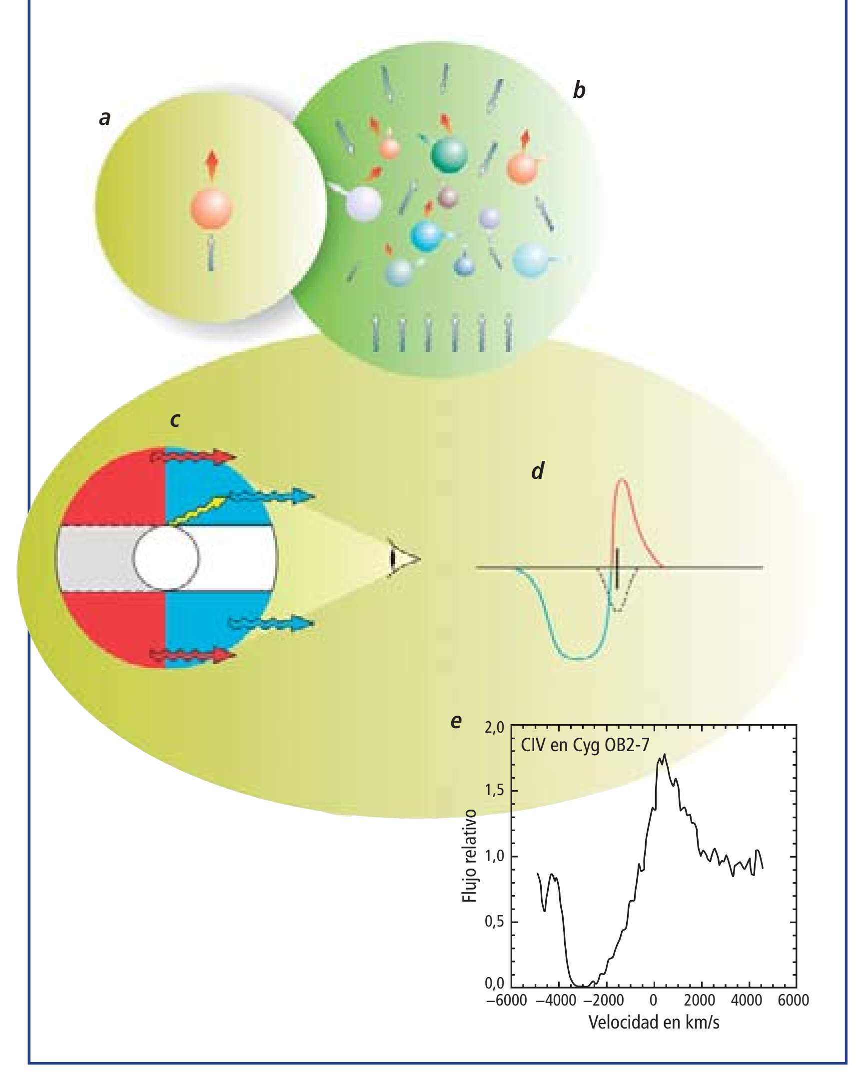
LAS GRANDES ESTRELLAS PIERDEN MASA

LOS PERFILES ESPECTRALES P-CYGNI indican una pérdida de masa de la atmósfera estelar. Cuando un átomo absorbe un fotón, no sólo absorbe su energía, sino también su momento lineal o cantidad de movimiento, lo que le acelera en la dirección del fotón incidente (*a*). En una atmósfera estelar hay una mezcla de átomos y fotones que se mueven en todas direcciones, pero la mayoría de los fotones se mueve hacia fuera de la estrella (*b*). De ahí resulta una aceleración neta del material hacia el espacio, un viento estelar.

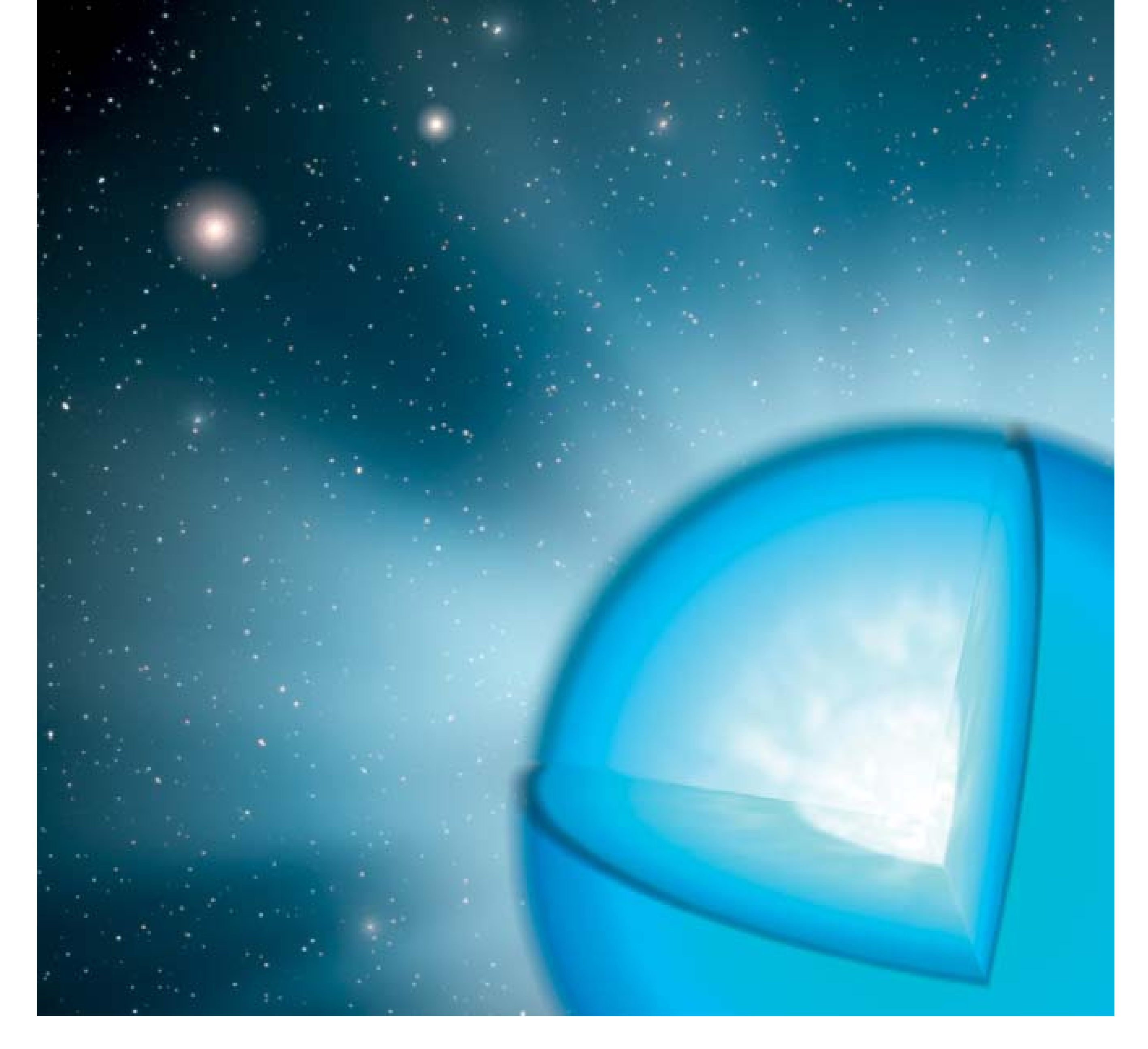
El espectro estelar que observaríamos en ausencia de viento es modificado por éste (*c*). Los fotones que escapan de la superficie de la estrella (*en amarillo*) y se perderían para un observador, se absorben en el viento, que puede reemitirlos en la dirección de ese observador. Como el material en el hemisferio anterior (*zonas azules y blanca*) se mueve hacia el observador y el del hemisferio posterior (*zonas rojas y gris*) se aleja de él, los fotones reemitidos están desplazados al azul y al rojo, respectivamente, por efecto Doppler.

La zona blanca absorbe los fotones que escapan de la estrella en dirección al observador. Se trata de la absorción desplazada al azul que vemos en los perfiles (*d*). La emisión de fotones desplazados al azul desde las zonas azules del viento estelar modifica esa absorción. Las zonas rojas producen la emisión desplazada al rojo. La zona gris no puede ser vista por el observador.

Además, hemos de considerar la posible línea de absorción intrínseca (en ausencia de viento) del espectro estelar (*línea de absorción punteada*). La superposición de todos los perfiles produce un típico perfil P-Cygni, como el de la estrella Cygnus OB2-7, que vemos en la gráfica inferior (*e*).



ARTEMIO HERRERO



2. ESTE CORTE muestra la estructura de una estrella masiva. La generación de energía tiene lugar sólo en la parte más interna, pero los movimientos convectivos hacen que todo el material del núcleo esté disponible para las reacciones nucleares. Por encima, hay una envoltura radiativa, y finalmente la fotosfera, de donde proviene la radiación visible que vemos. La alta luminosidad de la estrella impulsa un viento estelar que se extiende muchos radios estelares, contaminando con nuevo material el medio circundante e inyectándole energía mecánica y radiativa, que lo acelera y calienta. Hay indicios de que el viento no es completamente esférico y homogéneo, sino que contiene grumos de densidad más alta.

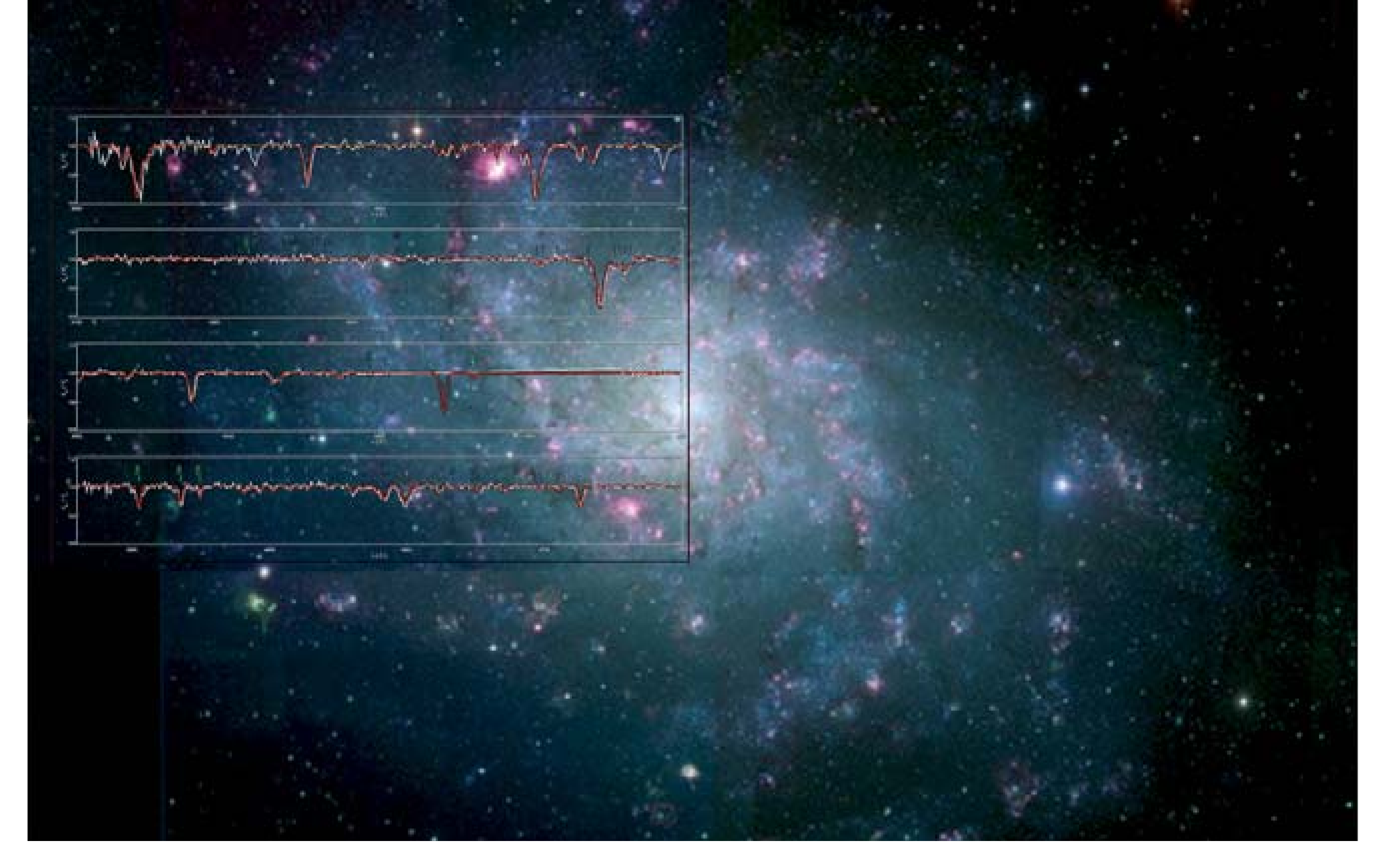
ARTEMIO HERRERO

la estrella, pero sólo producen modificaciones que, comparadas con el efecto de la masa, son, en general, pequeñas.

Bajo la acción del campo gravitatorio, las capas superiores comprimen las inferiores, que se adensan y calientan. Cuando alcanzan así una temperatura y densidad suficientes para encender las reacciones nucleares, ejercen a su vez una presión hacia fuera que equilibra el peso de las capas superiores. De ese modo, la estrella llega al equilibrio en su estructura por el solo efecto de su masa. Cuanto mayor es ésta, mayor es la presión que han de ejercer sus capas internas hacia fuera, lo que se logra mediante un aumento de la temperatura: cuanto mayor es la masa de una estrella, mayor es la temperatura en su centro, aunque no su densidad. (En contra de la intuición, las estrellas de mayor masa tienen un interior menos denso que las de masa menor, al menos al principio de su evolución.)

La temperatura central de una estrella determina el tipo de reacciones nucleares que tendrán lugar en su interior y su ritmo. Y, en consecuencia, con la producción de energía de la estrella. La energía generada en el interior estelar debe transportarse hacia fuera, hasta salir al espacio; por tanto, determinará el brillo de la estrella. Ahí se esconde la razón de que las estrellas de mayor masa sean las más luminosas.

La masa constituye, pues, la propiedad fundamental de una estrella. Perder masa repercute en su estructura y evolución. Con una pérdida moderada de masa, el efecto observado será sutil, ya que modificará sobre todo la



3. EN ESTA IMAGEN DE M33 obtenida con la cámara de gran campo del telescopio Isaac Newton de La Palma, se aprecian los brazos espirales y las regiones de formación estelar reciente (regiones HII, que brillan en el rojo debido a la emisión de la línea Hα del hidrógeno). Superpuesto, se muestra el espectro de la estrella UIT 103, de M33. En el eje de abscisas tenemos la longitud de onda y en el de ordenadas la energía relativa emitida por la estrella. El espectro nos indica que se trata de una estrella azul supergigante de tipo B temprano, con líneas anchas del H y líneas débiles de Si, He, O, C y N. El espectro observado, en blanco, está ajustado por el espectro calculado (*en rojo, superpuesto*). El ajuste de los espectros nos permite derivar las propiedades de las estrellas: temperatura, gravedad, luminosidad, radio, masa, abundancias químicas, etcétera. Realizando el análisis para muchas estrellas en M33, podemos extraer conclusiones sobre la estructura y evolución de galaxias espirales como la nuestra.

ARTEMIO HERRERO

extensión del núcleo convectivo de la estrella. Indirectamente, la pérdida de masa cambia en ese caso la cantidad de material disponible para la combustión nuclear y el tiempo de vida en la secuencia principal. Esto ocurre sobre todo en las estrellas de menos de 60 masas solares, durante su fase de secuencia principal.

Pero si la pérdida de masa es considerable, tendrá consecuencias decisivas. La rápida disminución de la masa total de la estrella altera su estructura interna; puede llegar incluso a eliminar las capas externas de la estrella, dejando al descubierto otras que estuvieron sometidas a las reacciones nucleares y cuya composición química difiere de la que tenía la estrella en su origen. Esa brusca disminución de masa modifica la explosión final de la estrella y el residuo que deja; se altera, por consiguiente, la relación entre la masa inicial y la masa final. Durante todo el proceso, además, el campo gravitatorio y el campo de radiación cambian; con otras palabras, la pérdida de masa altera profundamente la estrella.

Las estrellas que tienen entre ocho y veinte masas solares nacen con tipos espectrales más fríos que B0V —menos de unos 30.000 K en su superficie— y no les afecta mucho al principio de su evolución la pérdida de masa; después, cuando pasan a ser supergigantes B, las afecta sólo moderadamente.

Pero las estrellas que nacen con masas superiores, sobre todo si pasan de 60 masas solares, registran grandes pérdidas de masa al evolucionar desde enanas O hasta supergigantes O, Of (supergigantes O con emisión característica de NIII y de HeII) y B. Registran también pérdidas de masa en dos momentos posteriores: durante la fase de variable azul luminosa (LBV, del inglés "Luminous Blue Variable") y durante la fase de Wolf-Rayet.

La estrella de mayor masa

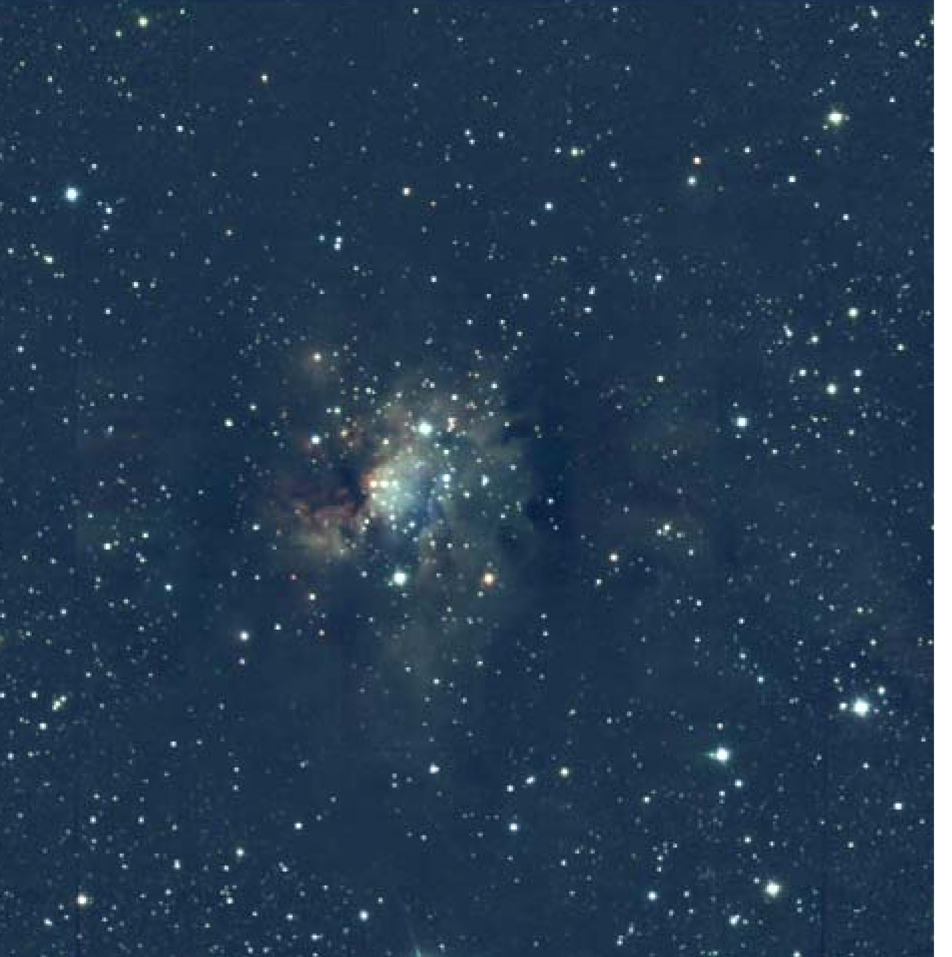
LBV es una clase heterogénea, que engloba estrellas azules supergigantes, caracterizadas por una amplia variabilidad no periódica en su magnitud aparente. Las estrellas LBV pueden pasar largos períodos en un estado que parece estable. El rasgo espectral más distintivo cuando se hallan en ese estado son unos perfiles espectrales estrechos y fuertes, del tipo P-Cygni. La propia estrella P-Cygni, que les da nombre, es una LBV que ha permanecido estable durante los últimos siglos. La sabemos variable porque hace 400 años su brillo cambió enormemente, pero apenas si ha vuelto a hacerlo desde entonces.

Sin embargo, estas estrellas pueden sufrir repentinas erupciones, en las que expulsan grandes cantidades de materia y sufren amplias variaciones de brillo. Un ejemplo es Eta Cari-

nae, que expulsó la Nebulosa del Homúnculo a mediados del siglo XIX. Las LBV pertenecen a una fase breve en la que la estrella reajusta su estructura. Aun cuando parecen corresponder a una evolución desde la secuencia principal hacia la fase de supergigante roja, su naturaleza exacta está todavía por determinar. Tampoco sabemos si todas ellas son iguales.

Las estrellas LBV marcan una región prohibida del diagrama HR; su frontera observada traza el "límite de Humphreys-Davidson". Por encima y a la derecha de este límite (mayores luminosidades y menores temperaturas) no se observan estrellas. Las erupciones de las LBV podrían corresponder a fases en las cuales la estrella se acerca mucho a ese límite o incluso lo cruza por breve tiempo.

Las candidatas más firmes al título de estrella de mayor masa de la Vía Láctea son LBV, entre ellas la propia Eta Carinae. La estrella de la Pistola (así llamada por la forma de la región que ilumina), cerca del centro de la Vía Láctea, podría haber tenido originalmente hasta 150 masas solares. Recientemente, se ha sugerido que LBV 1806-20 podría tener hoy 150 masas solares (lo que plantearía un reto a las teorías de estabilidad estelar), pero parece ser una estrella binaria. De igual modo, no podemos descartar en ninguno de estos casos la existencia de estrellas compañeras que estén impidiéndonos determinar la masa correcta.



4. G61.48+0.09, UN CUMULO ESTELAR, muy oscurecido, de nuestra galaxia. Las tres estrellas del centro, que forman un cinturón, son probablemente estrellas masivas. Es uno de los muchos cúmulos que están siendo actualmente descubiertos e investigados gracias a las técnicas en el infrarrojo.

ARTEMIO HERRERO

A pesar de las ambigüedades, resulta importante establecer la masa de las estrellas de mayor masa por medio de observaciones, porque no nos hallamos todavía capacitados para acotar la máxima masa posible de una estrella a partir de principios fundamentales. No sólo no sabemos qué masa máxima puede alcanzar una estrella, sino que ni siquiera estamos seguros de qué estrella de las que conocemos es la de mayor masa.

Las estrellas Wolf-Rayet (llamadas así en honor de quienes las descubrieron en 1867) no destacan por su brillo. Sin embargo, exhiben un espectro espectacular, caracterizado por líneas de emisión muy fuertes, con unas anchuras correspondientes a velocidades de algunos miles de kilómetros por segundo; llegan incluso a dominar el espectro de algunas galaxias. Hay dos clases de estrellas Wolf-Rayet: aquellas donde destacan las líneas de N y He (estrellas WN) y aquellas donde destacan las líneas de C y O, con algo de He (estrellas WC). Estas líneas se forman en vientos muy densos, tanto que sólo nos permiten ver las capas de la estrella que se mueven a velocidades supersónicas.

Ha costado mucho explicar semejantes vientos. Hoy día sabemos que se forman por la acción del campo de radiación, igual que en las estrellas O durante la fase de secuencia principal. Existe, no obstante, una diferencia: la eficiencia en la transferencia de momento es aquí mucho mayor, gracias a la intensidad del campo de radiación de la estrella Wolf-Rayet con respecto a su campo gravitatorio y la densidad de su viento.

La definición de estrella Wolf-Rayet se basa en la apariencia de su espectro, no en sus propiedades físicas. En su mayoría, las estrellas Wolf-Rayet son estrellas masivas en fases avanzadas de su evolución (aunque algunas estrellas, probablemente las de mayor masa, pueden tener la apariencia de WR incluso al principio de su vida). Han perdido parte importante de su masa inicial durante la fase de secuencia principal y LBV. Se encuentran evolucionando hacia el azul. Durante la fase Wolf-Rayet la estrella pierde la mayor parte de su masa, incluso más del 90 %; antes de explotar constituida en supernova puede haberse convertido en un objeto de unas pocas masas solares.

Las fases de estrella LBV y Wolf-Rayet inyectan en el medio interestelar un material distinto del inicial de la estrella. En las estrellas Wolf-Rayet, la intensa pérdida de masa ha dejado al descubierto capas donde antes se producían reacciones nucleares. Por consiguiente, la nueva atmósfera de la estrella abundará en los productos de la combustión: He y N si son productos del biciclo CNO, C

y O si son productos de la reacción triple alfa y la posterior captura de núcleos de He.

Una vida que se acelera

Al principio de su evolución, las estrellas dotadas de gran masa extraen su energía de la transformación de H en He a través de la serie de reacciones del biciclo CNO. En él, las estrellas transforman el H en He ayudándose del C, el N y el O, que desempeñan un papel análogo a los catalizadores de las reacciones químicas. El biciclo CNO requiere mayores temperaturas que la cadena protón-protón, es decir, la construcción de los núcleos de helio mediante sucesivas adiciones de un protón que proporciona al Sol su energía. Ahora bien, por encima de los 15 millones de grados, el biciclo genera más energía por unidad de masa. Una estrella de 5 masas solares tiene cerca de 600 veces la luminosidad solar, mientras que una de 100 masas solares alcanza un millón de veces la luminosidad del Sol.

El cambio de composición química supone un agotamiento paulatino del hidrógeno inicial, el combustible nuclear. Cuando se agota, el núcleo de la estrella se comprime y calienta hasta que enciende el siguiente ciclo de combustión nuclear, la combustión del He, cuando se alcanzan los cien millones de grados.

La producción de energía es tan intensa, que el combustible se agota rápidamente. Esta fase dura la décima parte que la de la secuencia principal. De nuevo, la composición química del núcleo cambia. Ahora, el helio se consume por medio de la reacción triple alfa; mediante sucesivas fusiones de núcleos de helio, se forman C y O. Tras el He, el siguiente paso es la combustión del C a unos a mil millones de grados. Por definición, llamamos estrellas masivas a aquellas que encienden de modo estable el carbono; para lograrlo, su masa inicial debe estar por encima de unas ocho masas solares. El valor exacto depende de los cálculos.

Cuando el C se agota, la secuencia de acontecimientos se precipita para las estrellas masivas. En unos cientos de años se transforma en neón (Ne) y O, y éste en silicio (Si) en sólo unos meses. En pocos días, el Si se transforma en Fe. Más allá del Fe, las reacciones son endotérmicas y requieren energía: la producción se detiene. Diferentes inestabilidades determinan el destino de la estrella; mas, agotado el Si, habrá en cualquier caso una explosión de supernova, en cuestión de segundos. Quedará como residuo una estrella de neutrones o un agujero negro.

El tipo de residuo que producirá una estrella depende, de nuevo, de la masa inicial de la estrella y de la historia de su pérdida de

EL DIAGRAMA DE HERTZSPRUNG-RUSSELL

EN ESTE DIAGRAMA DE HERTZSPRUNG-RUSSELL, donde se representa la temperatura efectiva (que determina la emisión por unidad de superficie de la estrella) frente a su luminosidad (energía total radiada por segundo al espacio), podemos seguir la evolución de las estrellas de más de 20 masas solares. Los círculos blancos representan la posición inicial de las estrellas en el diagrama; el número a la izquierda indica la masa inicial (en masas solares). Los puntos están conectados por una línea amarilla, que representa la secuencia principal de edad cero (SPEC), es decir, el lugar de "nacimiento" de las estrellas justo cuando acaban de encender el H en su centro.

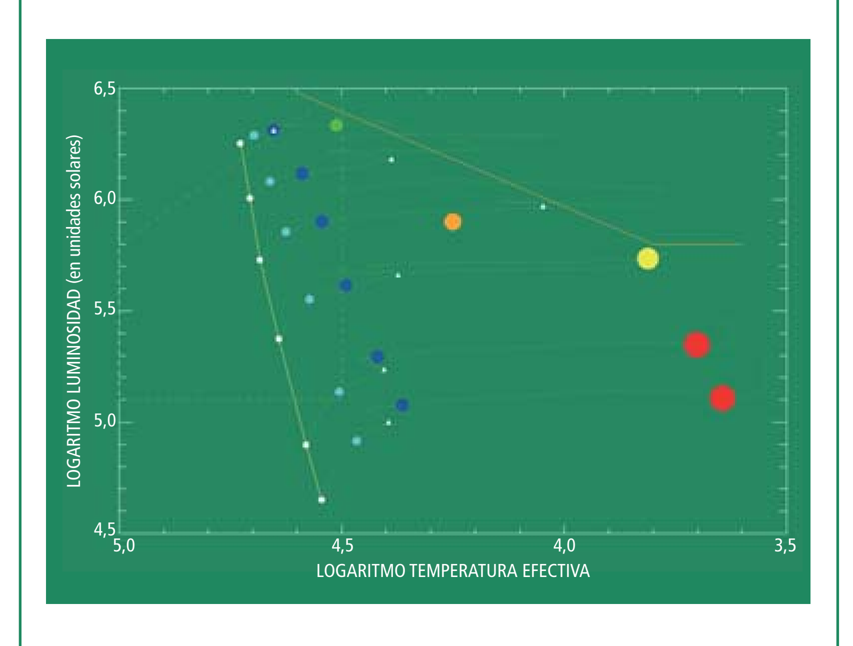
Al ir quemando H, las estrellas se mueven en el diagrama, separándose de la SPEC a lo largo de las trazas evolutivas (*líneas amarillas punteadas*). En su evolución, las estrellas aumentan de tamaño y se transforman en gigantes (*círculos azul claro*) y supergigantes (*círculos azul oscuro*). Los pequeños triángulos blancos indican el fin de la secuencia principal, es decir, el momento en que se agota el H en el centro de la estrella. A diferencia de lo que ocurre a masas más bajas, las supergigantes masivas pueden entonces ser todavía estrellas de la secuencia principal.

El tiempo que tarda una estrella en alcanzar la fase de gigante y supergigante depende estrechamente de su masa. La estrella de 120 masas solares tarda sólo un millón de años en transformarse en gigante; dos millones, en transformarse en supergigante. Siempre tiene un tipo espectral WR, O u Of.

La estrella de 20 masas solares necesita cinco y ocho millones de años para la misma transformación, y será una supergigante B. Tras la secuencia principal la estrella comienza a quemar He en el centro y evoluciona rápidamente. Las estrellas de 20 y 25 masas solares se transforman en supergigantes rojas, que explotan como supernovas de tipo II tras quemar el C (y los demás elementos hasta el Fe). Las estrellas de masa mayor pueden volver hacia la zona de altas temperaturas ('lazos azules') y acaban transformándose en estrellas Wolf-Rayet, que se encuentran en la zona delimitada por la línea verde de trazos (para evitar confusión no hemos prolongado las trazas evolutivas hasta esa zona).

La estrella de 120 masas solares se transforma directamente en Wolf-Rayet (*círculo verde*) debido a su enorme pérdida de masa. Las Wolf-Rayet acabarán explotando como supernovas de tipo Ib o Ic. La línea naranja marca el límite de Humphreys-Davidson, por encima del cual sólo se observan estrellas en fases inestables (aunque las trazas evolutivas lo crucen).

Las estrellas LBV se encuentran cerca de este límite (como P Cygni, representada por el círculo naranja) y se sospecha que pueden experimentar vigorosas erupciones cuando se aproximan mucho al límite o lo cruzan. Los radios de los círculos indican la expansión de la estrella, pero no su escala.



ARTEMIO HERRERO

GALAXIA cB58 A
Z = 2,723

STARBURST
EN NGC 4214

ESTRELLA 0900
EN M33

1200 1300 1400 1500 1600 1700

5. LAS ESTRELLAS MASIVAS nos ayudan a entender el universo profundo. Así ocurre, por ejemplo, en esta comparación del espectro de una estrella B supergigante (marcada con un círculo rojo en el centro de la imagen inferior) de la galaxia M33, dentro de nuestro Grupo Local (a 0,7 Mpc), con el de una región de intensa formación estelar en la galaxia cercana NGC 4214 (a unos 3-4 Mpc) y el de la galaxia MS 1512-cB58 (a z = 2,72). El espectro de cB58 nos llega desplazado al rojo, por lo que lo observamos desde Tierra en el rango óptico, mientras que el de M33-0900 y NGC 4214 se ha observado desde el espacio. Aquí hemos desplazado el espectro de cB58 a su posición original para ver que los rasgos de su espectro guardan una estrecha correspondencia con los del estallido de NGC 4214 y los de la estrella B de M33, lo que nos proporciona pistas claras sobre el origen de la radiación emitida por cB58.

masa. La teoría predice que hasta las 25 masas solares el residuo será una estrella de neutrones (es decir, un objeto compacto de algo menos de 2 masas solares); por encima de esa cota se producirán agujeros negros.

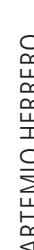
Sin embargo, si la pérdida de masa en la fase de Wolf-Rayet es muy alta (en el límite superior de lo permitido por las observaciones), las estrellas con masas de alrededor de 50 masas solares podrían haber perdido tanta masa, que acabasen convertidas en estrellas de neutrones, no en agujeros negros.

En cambio, si esa pérdida de masa es baja (en el límite inferior de lo permitido por las observaciones), la masa del residuo crecerá siempre con la masa inicial: a partir de las 25 masas solares iniciales, tras la explosión de la supernova sólo se producirán agujeros negros.

A lo largo de ese curso evolutivo, la estrella masiva nacida con estructura de estrella O o B modifica su apariencia externa y su posición en el diagrama HR, pasando por fases con rasgos espectrales propios —estrella Of, supergigante B, LBV, supergigante roja y WR—, aunque sólo las dotadas de una masa enorme recorren las fases de LBV y WR.

Rotación

Aunque la descripción anterior es correcta en líneas generales, para entender ciertos datos que no admiten explicación dentro de ese marco hay que tomar en cuenta la rotación. La principal de esas anomalías consiste en unas abundancias anómalas, sobre todo unos enriquecimientos de He y N y déficits de C y O no sólo en estrellas moderadamente



evolucionadas, como las supergigantes A y B, sino también en estrellas O cercanas a la secuencia principal, en el principio mismo de su vida. Estas anomalías son más claras en algunas estrellas de alta velocidad de rotación, por encima de 250 km/s (el Sol rota a unos 2 km/s, pero debe tenerse en cuenta que es una estrella de muy lenta rotación).

La rotación, cuyo papel es aún hipotético, puede dar cuenta de las anomalías porque mezcla el material estelar llevándolo del interior, donde lo han procesado las reacciones nucleares, hasta la superficie; opera con tanto mayor rendimiento cuanto mayor sea la masa de la estrella. Así aparece materia contaminada por el ciclo CNO en la superficie.

Además, la rotación explicaría ciertas diferencias en el comportamiento de las estrellas a diferentes metalicidades durante su evolución; por ejemplo, que pasen proporcionalmente más tiempo como supergigantes rojas que azules (con lo que aumenta el número relativo de supergigantes rojas). Podría deberse a un aumento de la velocidad de rotación promedio de las estrellas a bajas metalicidades. Por qué las estrellas deben tener rotaciones más altas a bajas metalicidades es una cuestión todavía no aclarada.

El efecto de la rotación no cesa cuando la estrella sale de la secuencia principal. El interior estelar puede seguir rotando muy rápidamente. Tal rotación vertiginosa desempeña una función determinante en los modelos de explosión de supernova que producen erupciones de rayos gamma (GRB). Junto con el papel que pueda desempeñar el campo magnético, todavía poco explorado en las estrellas masivas, se requiere rotación para que una estrella masiva genere erupciones.

No obstante, el grado de rotación ha de ser el adecuado. Una rotación demasiado rápida o demasiado lenta impedirá la erupción. Se trata

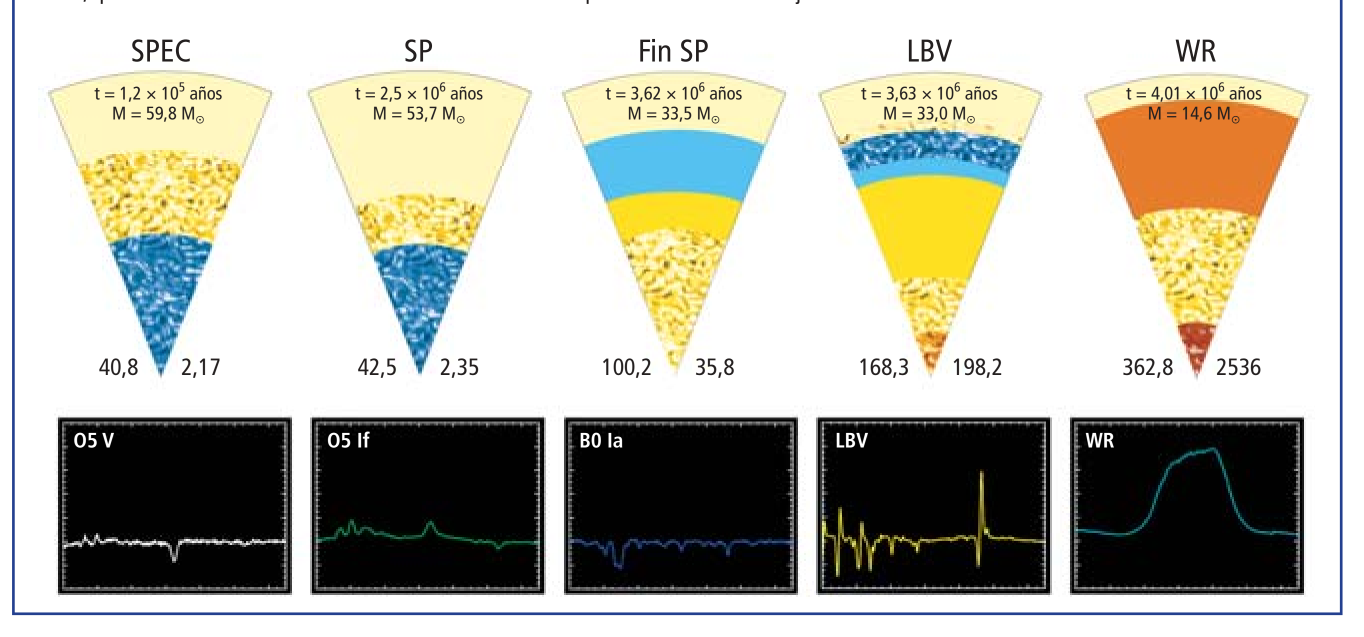
LA VIDA DE UNA ESTRELLA MASIVA

ESTE CORTE MUESTRA LA ESTRUCTURA INTERNA de una estrella de 60 masas solares durante las diferentes fases de su evolución. Comienza en la secuencia principal de edad cero (SPEC) y sigue hasta el final de dicha fase (agotamiento del H en el centro), la fase de LBV (*variable azul luminosa*), y la de Wolf-Rayet (WR), tras la cual explota como supernova. Debajo se muestran espectros de estrellas que se corresponden con dichas fases, con su clasificación espectral. La zona representada va de 462,0 a 475,0 nanómetros y está dominada por la línea λ468.6 del helio ionizado (*en el centro de los diagramas*), y líneas de N y C (*hacia la izquierda*).

La escala vertical del espectro de la WR ha sido reducida 10 veces para poder compararla con la de las demás. Las estrellas se representan en unidades de masa relativa, de modo que el centro es el origen y el borde superior tiene masa relativa igual a 1. Para hallar la masa absoluta hemos de multiplicar por la masa total de la estrella en cada caso, que varía enormemente durante la evolución debido a la pérdida causada por el viento estelar, como vemos en los números de la parte superior, que también dan el tiempo transcurrido desde el nacimiento.

El radio de la estrella varía muchísimo: para los cinco instantes de la vida de la estrella representados vale 10,9; 20,1; 36,6; 524,0 y 10,7 radios solares. Se aprecia que la evolución es cada vez más acelerada. Los números a la izquierda y derecha de los vértices de los conos dan la temperatura (en millones de kelvin) y densidad (en g/cm³) en el centro de la estrella. La densidad central es relativamente baja al principio, apenas el doble de la del agua. La evolución incrementa tales valores de modo continuo.

Los colores representan la generación de energía; el azul, transformación de H en He; el naranja, de He en C; el rojo, de C en Ne y O; el amarillo, que no hay reacciones nucleares. Vemos que las zonas de combustión avanzan progresivamente hacia fuera. La convección en la estrella, que produce mezcla de material, está presente en las zonas con “burbujeo”.



ARTEMIO HERRERO



6. EL GRAN TELESCOPIO DE CANARIAS, en la isla de La Palma, que ha visto la primera luz recientemente. El GTC, compuesto por 36 segmentos hexagonales de 1,9 m, tiene una superficie colectora equivalente a un espejo de 10,4 m de diámetro: se trata del mayor telescopio óptico-infrarrojo del mundo. Entre otras cosas, el GTC será un magnífico cazador de estrellas masivas en nuestro universo local.

INSTITUTO DE ASTROFISICA DE CANARIAS

de una nueva ligadura entre la evolución de la estrella y la pérdida de masa, ya que el viento estelar se lleva consigo momento angular y varía por tanto la rotación de la estrella, que a su vez induce el transporte de momento angular desde el centro a la superficie. La rotación final del núcleo estelar dependerá, pues, del momento angular perdido a través del viento estelar.

Ionizaciones

La temperatura de la estrella repercute de manera directa sobre la cantidad de fotones ionizantes. Los fotones ultravioleta que escapan de la estrella ionizan los átomos de hidrógeno del medio que la rodea. Los electrones liberados se recombinan luego con los protones para volver a formar hidrógeno neutro; al hacerlo, caen en cascada hacia los niveles inferiores de energía del átomo emitiendo fotones en diferentes longitudes de onda, entre ellas algunas del visible. A ello se debe que las regiones en torno a las estrellas masivas se hallen ionizadas y brillen; se las llama regiones HII.

El brillo de las regiones HII depende del número de fotones ionizantes que escapan de la estrella. Podemos medir la cantidad de energía emitida en alguna longitud de onda apropiada; si, además, conocemos el número de fotones que están ionizando la región, podremos deducir la densidad y composición química de la zona en cuestión. Y si estos parámetros ya se conocen, será posible deducir el número de fotones ionizantes y, a partir de él, las propiedades de las estrellas ionizantes, en particular su masa y su estado evolutivo.

Las estrellas masivas suelen nacer agrupadas en cúmulos. En estas regiones de intensa formación estelar, importa sobremanera conocer el número de fotones ionizantes emitidos. En nuestra galaxia hay algunas más bien modestas, como Cyg OB2 o NGC 3603, pero estamos aprendiendo deprisa que puede haber una cantidad abundante de estrellas masivas a las que sólo podemos acceder en el infrarrojo. Un ejemplo puede ser la propia región Cyg OB2. Observada en infrarrojos, se encuentra que esta región contiene un número de estrellas de los tipos O y B masivas mucho mayor del que la observación en el visible hacía pensar. Su masa total puede alcanzar las 10^4 masas solares. Pero el título de mayor cúmulo estelar conocido en la Vía Láctea corresponde a Westerlund-1, un cúmulo oscurecido por el polvo interestelar, conocido desde los años sesenta del siglo XX, pero del que sólo recientemente se ha sabido reconocer su peculiaridad. Con unas 30 WR identificadas en su seno, Westerlund-1 debe de tener cerca de 10^5 masas solares. Entre Cygnus OB2 y Westerlund-1 se sitúa un número creciente de cúmulos sólo accesibles en el infrarrojo, como RSG-1 y RSG-2, que contienen un número tan grande de supergigantes rojas que sólo pueden haberse producido en un cúmulo de masa cercana a la de Westerlund-1, o los cúmulos del Quintuplete y del Arquero, cerca del centro galáctico. Este último contiene la estrella de la Pistola mencionada antes, la mejor candidata a estrella de mayor masa de la Vía Láctea que conocemos. Su masa inicial debió de ser del orden de 150 veces la masa del Sol, y el estudio de la población del Arquero indica que ésa parece ser la mayor masa con que una estrella puede formarse.

¿Cuántas regiones más de intensa formación estelar nos están esperando en la Vía Láctea, ocultas tras las nubes de gas y polvo del disco de la galaxia? Apenas hemos comenzado nuestra exploración y ya nos estamos dando cuenta de que nuestra galaxia, lejos de ser una modesta fábrica, como hemos creído hasta hace poco, es en realidad una poderosa máquina de formar estrellas. Pero incluso así, no podemos sustraernos a la impresión que otras regiones en galaxias cercanas nos producen.

Estrellas masivas en otras galaxias

Las estrellas masivas son objetos sumamente luminosos. La mayor parte de esa luminosidad corresponde a energía emitida en longitudes de onda ultravioleta, que no puede atravesar la atmósfera y que la materia interestelar extingue. Sin embargo, emiten suficiente energía en el óptico como para que podamos observarlas con detalle en galaxias externas. Resulta así posible obtener espectros de estrellas masivas no sólo en las Nubes de Magallanes, sino también en galaxias espirales similares a la Vía Láctea, como M31 (Andrómeda) y M33 (la galaxia del Triángulo). Con los telescopios de 8 a 10 metros

de diámetro podemos estudiar el espectro de estrellas individuales en galaxias más allá del Grupo Local.

Una razón primaria de estos estudios es la pura curiosidad y el reto de ver cada vez más lejos. Pero el interés científico trasciende ese desafío. La supernova SN1987A de la Gran Nube de Magallanes nos ofrece un ejemplo impresionante. Se sabía cuál había sido su progenitora: una estrella supergigante azul, no roja, lo que carecía de justificación en las teorías de la evolución estelar de entonces. Los primeros intentos de explicación hacían hincapié en la evolución binaria y, sobre todo, en la diferente metalicidad. Las Nubes de Magallanes presentan una metalicidad de entre un tercio y un octavo de la de nuestra galaxia.

La composición química es un factor muy importante en la estructura y evolución de las estrellas. En las Nubes de Magallanes encontramos la oportunidad de contrastar nuestras teorías estudiando la evolución a diferentes metalicidades, tarea imposible si nos limitamos a nuestra galaxia. Podemos preguntarnos, entre otras cuestiones, si las estrellas se forman igual en las Nubes y en la Vía Láctea. O si, una vez formadas, la única diferencia estriba en la composición química y los cambios que induce directamente.

A pesar de su menor tamaño, la Gran Nube de Magallanes tiene regiones donde la formación estelar es más intensa que en cualquiera de la Vía Láctea, como 30 Doradus, con muchas estrellas O3, el tipo espectral más caliente que se conoce y que corresponde a las estrellas de mayor masa (aunque se ha propuesto hace poco el tipo espectral O2). Si bien no acabamos de desentrañar el mecanismo por el que se forman las estrellas masivas, parece que en ambas galaxias procede de la misma manera.

Las características de la formación estelar se estudian mediante la "función inicial de masas", que nos da la fracción de estrellas de una determinada masa que se forman. Imaginemos una nube de gas de cierta masa, a punto de crear un conjunto de estrellas. La función inicial de masas nos dirá cómo va a repartir ese brote su masa total entre las estrellas de distinta masa. La investigación reciente señala que no hay diferencias significativas entre la función inicial de masas de las Nubes de Magallanes y la de la Vía Láctea. Tampoco parece haberla en la masa máxima de las estrellas formadas. De confirmarse, significaría que la metalicidad no tiene un papel esencial en la formación estelar, aunque sí podría tenerlo el entorno, por las diferencias que se observan entre cúmulos, y entre éstos y las estrellas individuales, "de campo".

Sin embargo, disponemos de indicios de que la distribución de la velocidad de rotación estelar en las Nubes podría diferir de la observada en la Vía Láctea. Cuanto menor sea la metalicidad, mayor podría ser la fracción de estrellas de rotación rápida. Además, las abundancias iniciales de N en la Pequeña Nube de Magallanes son muy bajas, incluso más bajas de lo que le corresponde cuando se recalculan las abundancias solares para adaptarlas a la metalicidad de la Pequeña Nube. Por ello, la transformación de C en N durante el ciclo CNO puede resultar en incrementos de la abundancia de nitrógeno del orden de un factor 50-100, en vez de los factores 10-20 de nuestra galaxia. Cuando se llevan estos metales a la superficie, producen grandes sobreabundancias de N. Si la rotación es fundamental en la evolución de las estrellas masivas, las Nubes de Magallanes podrían darnos el lugar ideal para comprobarlo.

La teoría de los vientos impulsados por radiación predice que el momento del viento depende de la metalicidad estelar. De ser correcta la tesis, las estrellas masivas de las Nubes de Magallanes deberían mostrar vientos más débiles que sus homólogas galácticas, espe-

7. LA GRAN NUBE DE MAGALLANES consta de estrellas más pobres en elementos pesados que las de la Vía Láctea. Sirve por ello para constatar las teorías que ligan de manera diferente la evolución de las estrellas a su composición química.



NASA/JPL-CALTECH/M. MEIXNER (*STScI*) Y THE SAGE LEGACY TEAM



8. LAS CUATRO ESTRELLAS supermasivas del Trapecio iluminan la nebulosa de Orión. Más de mil estrellas jóvenes se concentran en esta fábrica de estrellas.

NASA/JPL-CALTECH/STScI

cialmente las de la Pequeña Nube. La relación entre el momento del viento y la luminosidad nos permite determinar la luminosidad de la estrella y, por ende, su distancia; basta con estudiar el espectro estelar. Ello nos proporciona un indicador independiente de distancias hasta donde sea posible observar el espectro de estas estrellas.

Aunque la comprobación definitiva todavía debe esperar a que dispongamos de un mayor número de análisis detallados, las observaciones indican que los vientos son más débiles en la Pequeña Nube que en la Vía Láctea y que se comportan como predice la teoría.

Las Nubes de Magallanes, a unos 50 kiloparsec (Kpc) de nosotros —alrededor de 160.000 años-luz—, configuran el primer peldaño para salir de nuestra galaxia. El siguiente paso supone aumentar esa distancia en más de un orden de magnitud, hasta alcanzar los 750-850 Kpc a que se encuentran M31 y M33. Pero mientras que las Nubes de Magallanes son galaxias irregulares, M31 y M33 son espirales, muy semejantes a la Vía Láctea. Su estudio resulta, pues, de particular interés para nosotros.

Importa, en particular, conocer el cambio de composición química con la dis tancia al centro de la galaxia. En la Vía Láctea, todos los tipos estelares son aptos para esa investigación, ya que cabe observarlos, sin exceptuar alguno, con alta resolución y alta relación entre señal y ruido. Pero a la distancia de M31 y M33, sólo podemos abordar con alguna precisión las estrellas más brillantes: las supergigantes de tipos B y A.

Evolución estelar y composición química galáctica

La evolución de las estrellas produce cambios en la composición química de las galaxias. Si las estrellas se formaron primero en el centro de las galaxias, el número de generaciones estelares disminuirá desde el centro hacia el exterior. En este modelo, el centro habrá gozado de mayores posibilidades de enriquecerse con metales, mientras que hacia fuera las estrellas serán cada vez más pobres en metales. Es decir, existirá un gradiente de metalicidad a lo largo de la galaxia.

Además, estrellas de diferente masa terminan su vida contribuyendo de diferente modo a la química de las galaxias. Las estrellas masivas enriquecen el medio interestelar principalmente con elementos alfa (O, Mg, Si); las estrellas de baja masa, con elementos del grupo del Fe. Así, el estudio de la relación O/Fe nos habla también de la formación de estrellas en el pasado de las galaxias.

Establecer estos gradientes en la Vía Láctea resulta complicado, ya que hacia el centro y a lo largo del disco de la galaxia la extinción interestelar limita el alcance de las observaciones. Además, la determinación de distancias en el interior de nuestra propia galaxia resulta bastante problemática e insegura, salvo que contemos con una referencia cercana (una Cefeida o una RR Lyrae, por ejemplo).

En las galaxias M31 y M33 no aparecen tales dificultades. Nos permiten estudiar las abundancias de muchos elementos a lo largo de una galaxia. Estos estudios pueden luego compararse ventajosamente con otros indicadores: regiones HII, nebulosas planetarias o remanentes de supernova procedentes de la explosión de las mismas estrellas masivas.

Los gradientes de metalicidad en M31 y M33 aportan información adicional sobre la razón de dependencia entre evolución de estrellas masivas y composición y entorno. El rango de metalicidad cubierto no difiere mucho del que presenta el conjunto Vía Láctea-Nubes de Magallanes, pero las condiciones de formación son más homogéneas. En M31 y M33 comparamos estrellas formadas en galaxias espirales, mientras que en la Vía Láctea y las Nubes comparamos un sistema espiral con sistemas irregulares mucho menores. La comparación de los gradientes de las tres espirales del Grupo Local apunta a una relación entre el gradiente de metalicidad y el tamaño de la galaxia.

Empezamos ahora a explotar la capacidad de la nueva generación de telescopios de ocho a diez metros. Permiten observar estrellas en

El autor

Artemio Herrero, nacido en Valencia en 1959, comenzó sus estudios de Física en esta ciudad y se licenció en la Universidad de La Laguna. Se doctoró en 1986 en la Universidad de Múnich. Catedrático de astrofísica de la Universidad de La Laguna, fue director de su departamento de astrofísica y es actualmente coordinador de investigación del Instituto de Astrofísica de Canarias. Es autor de más de 70 publicaciones sobre las estrellas masivas en revistas internacionales.

galaxias a la distancia de M31 y M33, o más allá. ¿Hasta dónde será posible llegar en el estudio de estrellas individuales? Dado el tamaño del telescopio, depende de otros dos factores: el brillo de las estrellas y la calidad (resolución y razón entre señal y ruido) con que debamos observar el espectro estelar.

Las supergigantes A son las estrellas más brillantes gracias a su radio, enorme, y temperatura bastante alta. Su espectro, sin embargo, aparece lleno de líneas estrechas, muy próximas entre sí. Las supergigantes B brillan menos; aunque son más calientes y emiten más por unidad de área, son menores sus radios y superficies. Pero sus espectros, aun mostrando copiosa cantidad de elementos, se encuentran menos saturados y requieren, por tanto, menor resolución y nivel de señal con respecto al ruido para su análisis.

Así, las supergigantes B nos han llevado hasta NGC 300, una galaxia espiral a 2,2 Mpc de nosotros, tres veces la distancia de M31 y M33. Las estrellas A nos han transportado más lejos, hasta los 6,7 Mpc de NGC3621, pero al precio de derivar sólo metalicidades conjuntas y no abundancias individuales. Aunque debemos señalar que la primera estrella para la que se derivaron abundancias individuales más allá del Grupo Local no fue una supergigante B, ni una supergigante A, sino una Ofpe/WN11 (un tipo con características espectrales mixtas, entre estrella O y WR). Según las previsiones, con los avances de los detectores y las técnicas podremos analizar estrellas situadas a 10 o 20 Mpc. Así empezaríamos a introducirnos en los grandes cúmulos de galaxias, como el de Virgo.

El universo profundo

¿Y más allá? A partir de Virgo el hacinamiento estelar hace muy improbable la investigación de estrellas individuales. Debemos conformarnos con el estudio de regiones que contienen muchas estrellas a la vez, en especial los brotes de formación estelar dominados por estrellas masivas.

Las estrellas masivas emiten el máximo de su energía en el ultravioleta. En condiciones normales, la atmósfera terrestre nos impide observar esa región del espectro. Pero cuando el espectro queda desplazado al rojo debido a la expansión del universo, la radiación ultravioleta nos llega desplazada hasta el óptico. Así, para una región situada a una distancia de $z = 3$ la radiación emitida a 1500 angstrom puede ser observada en la Tierra a 4500 angstrom, en pleno rango visible. (El corrimiento z mide el desplazamiento del espectro hacia el rojo como consecuencia de la expansión del universo; cuanto más tiempo haya transcurrido desde la emisión, mayor será z y más alejada estará hoy la fuente.)

El flujo de energía que nos llega de regiones tan lejanas es muy débil, condición que dificulta su análisis. Algunas veces, sin embargo, la fortuna viene en nuestro auxilio. La luz de la galaxia cB58, situada a un z de 2,58, atraviesa en su camino hasta nosotros una lente gravitatoria, que amplifica la señal que nos llega. Así se ha podido obtener un excelente espectro de esta galaxia. Su análisis nos revela que ya en esa época la metalicidad era comparable a la hallada en la Gran Nube de Magallanes; la peculiar distribución de abundancias sugiere que estamos observando la galaxia en una época muy activa de su evolución.

El universo temprano debió de contaminarse químicamente muy pronto. Debió de empezar esa contaminación con una primera generación de estrellas muy particular: la población III, las primeras estrellas que se formaron. Carecían inicialmente de metales; debieron de crearlos a partir de la cadena protón-protón. Como ésta produce menos energía, el efecto de la presión de la radiación sería menor: la masa de las estrellas de esta primera generación tuvo que ser mucho mayor que la masa de las actuales. Habría vientos estelares muy débiles, de nuevo por la falta de metales; no perderían momento angular durante su evolución. En consecuencia, el transporte de material y momento angular desde el interior les conferiría altas velocidades de rotación en la superficie.

No contamos con datos observacionales para esta primera generación de estrellas. En algún momento tras la gran explosión, el universo se volvió transparente a la radiación y se recombinó, es decir, protones y electrones se unieron para formar H neutro. Pero ése no es el estado actual de nuestro universo, por lo que en algún momento hubo de producirse una reionización. Requirió una intensa fuente de fotones ultravioletas, capaces de ionizar el H.

Las estrellas masivas que conocemos son una poderosa fuente de fotones así, pero las estrellas de población III serían todavía más intensas, porque en las actuales los metales bloquean la radiación ultravioleta en la atmósfera estelar. Ausentes los metales en las primeras estrellas, el H y el He solos no absorberían sino una cantidad mucho menor de fotones UV. Estos podrían entonces escapar al medio circundante y reionizarlo.

Aun cuando es posible que nunca lleguemos a detectar las estrellas masivas de la población III directamente, su huella puede haber quedado impresa en el universo primitivo de modo indeleble, para ayudarnos a comprenderlo.

Bibliografía complementaria

STELLAR ASTROPHYSICS FOR THE LOCAL GROUP. A. Aparicio, A. Herrero, F. Sánchez. VIII IAC Winter School of Astrophysics, Cambridge University Press, 1998.

WINDS FROM HOT STARS. R. P. Kudritzki y J. Puls en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 38, pág. 613; 2000.

THE EVOLUTION AND EXPLOSION OF MASSIVE STARS. S. E. Woosley y A. Heger en *Reviews of Modern Physics*, vol. 74, pág. 1015; 2002.

MASSIVE STARS IN THE LOCAL GROUP. P. Massey en *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 41, pág. 15; 2003.

A MASSIVE STAR ODYSSEY: FROM MAIN SEQUENCE TO SUPERNOVA. K. Van der Hucht, A. Herrero y C. Esteban, IAU symposium 212, *Astronomical Society of the Pacific*; 2003.

PUNTOS

John A. Tarduno



1. LA LAVA EN ERUPCION de un volcán activo de Hawai procede de un punto caliente, una especie de llama que ardiese a través de la corteza de la Tierra.

RENE FREDERICK *Getty Images*

¿Dónde estaba el cono? A bordo, acabábamos de recuperar el tubo de perforación, para sustituir el desgastado trépano, y lo habíamos devuelto ya al fondo del mar, a unos 1500 metros de profundidad. Desde la sala de control observábamos las imágenes captadas por la cámara del extremo de la tubería. Buscábamos un cono que habíamos dejado a modo de baliza, para volver a perforar en el mismo sitio. El equipo ya había realizado esta operación en muchas ocasiones. Solíamos ver algún pez, o un calamar que se agarraba un momento a la tubería, y luego aparecía el cono. Esta vez sólo vimos el pez y el calamar ¿Qué había ocurrido?

Habíamos venido al océano Pacífico noroccidental para obtener muestras de los volcanes sumergidos y extinguidos que reciben el nombre de montañas submarinas del Emperador, la rama más septentrional de la cadena volcánica de Hawai-Emperador. Junto al encaje, como de piezas de rompecabezas, de los perfiles de Africa y Sudamérica, ha venido sirviendo de prueba de la tectónica de placas, teoría según la cual la superficie del planeta constituye un mosaico de piezas rocosas en cambio permanente.

Estas islas y montañas sumergidas forman una línea asombrosamente recta de más de 3500 kilómetros a lo largo del océano Pacífico. La antigüedad de sus rocas aumenta a medida que nos acercamos al extremo noroccidental de la cadena: desde la Isla Grande (que todavía crece), pasando por Maui, Oahu, Kauai, hasta el atolón de Midway, cuyo volcán, extinguido hace mucho, subsidió tanto, que apenas emerge sobre la superficie del mar. Más allá de Midway, la línea gira bruscamente y sigue en dirección norte, a lo largo de las montañas submarinas del Emperador. Llega casi hasta las islas Aleutianas.

La explicación comúnmente admitida de semejante conformación se basaba en las ideas enunciadas por J. Tuzo Wilson en 1963: las islas serían un registro del movimiento de la placa del Pacífico sobre un punto caliente volcánico. Cabe imaginar un punto caliente como una vela encendida en el interior de la Tierra cuya llama ardiese a través de la corteza, expulsara lava a la superficie y formase una isla. Las placas, en permanente movimiento, alejan la isla del punto caliente, el punto caliente genera una nueva isla y el ciclo continúa. El punto caliente y la tectónica de placas originan al alimón islas de un modo que recuerda a una cadena de montaje.

En 1971, Jason Morgan, de la Universidad de Princeton, fue más lejos. Sostenía que la "vela" era el extremo fundido de un penacho de roca ardiente que ascendía desde las pro-

CALIENTES EN MOVIMIENTO

Sobre los puntos calientes, fuentes de material fundido procedente de las profundidades del planeta, se creía que permanecían fijos. Hoy se suman a la lista de las partes móviles de la Tierra

fundidades del manto terrestre. Apresado en el interior del planeta, el punto caliente no se movería; sólo la placa lo haría. Según esta interpretación, el punto caliente de Hawai se habría mantenido fijo a una latitud aproximada de 19 ºN, mientras que la placa del Pacífico se habría movido hacia el noroeste unos 10 centímetros al año. El gran giro en la trayectoria se debería a que la dirección del movimiento de la placa sufrió un súbito cambio hace unos 47 millones de años.

Aparte de dar respuesta a la evolución de Hawai y otros arcos insulares, la posición fija de los puntos calientes ha proporcionado un óptimo conjunto de puntos de referencia geológicos, gracias a los cuales han podido reconstruirse los movimientos de las placas y determinarse la localización original de distintas muestras geológicas; muestras que son testigos extraídos de sedimentos o rocas de las que se deduce el movimiento de la parte sólida del planeta en relación con el eje de rotación terrestre. Por todo ello, la posibilidad de que los puntos calientes no sean lo que aparentan ha sacudido a la comunidad de geólogos.

Recientemente, mis colaboradores y yo hemos demostrado que los puntos calientes no son fijos. En cierto sentido, se parecen al cono que dejamos en el fondo del Pacífico a modo de hito de referencia. Cuando no lo encontramos, pensamos que las corrientes marinas debían de haberlo arrastrado. Resituamos el barco, localizamos el punto de perforación y continuamos con el trabajo sin cono que nos guiara. De manera parecida, la geofísica debe ahora descubrir por qué se desplazan los puntos calientes y encontrar una forma nueva de tomar referencias.

Registros magnéticos

La prueba que zanjó la polémica sobre la tectónica de placas hace más de cuarenta años, y que desde entonces ha contribuido al conocimiento de los puntos calientes, fue el registro del movimiento de las placas proporcionado por la magnetización de las rocas. Cuando se enfría la lava, los minerales magnéticos presentes, principalmente magnetita y titanomagnetita, cristalizan. Estos minúsculos imanes se fijan en la dirección del campo magnético terrestre existente en esa posición sobre la superficie en ese momento.

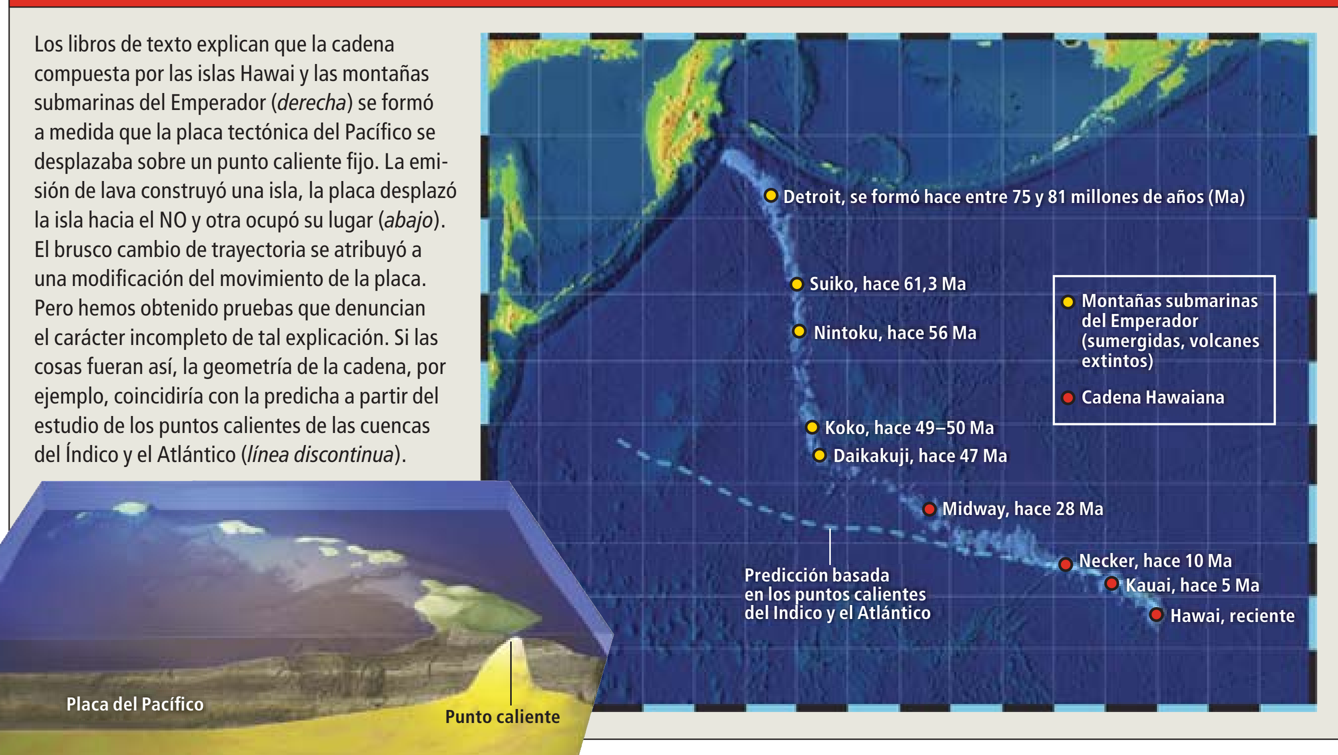
Puesto que el campo magnético terrestre varía en el tiempo y el espacio, la magnetización de las rocas proporciona dos modos de determinar el movimiento de las placas. En primer lugar, los geólogos abordan las variaciones temporales. A intervalos irregulares, el campo magnético terrestre revierte su polaridad: los polos Norte y Sur intercambian su lugar. Consideremos el efecto ejercido por la lava expulsada sobre las dorsales mesooceánicas. Cuando la roca emerge y se enfría, la magnetización de sus minerales los alinea, como si fueran limaduras magnéticas que señalasen al norte. A continuación, la tectónica de placas desplaza las rocas lejos de la dorsal. Tras varios centenares de miles de años, se invierte la polaridad. Desde ese momento, las nuevas rocas en formación se magnetizan en dirección opuesta. El movimiento de la placa las aleja también de la dorsal. La polaridad puede invertirse de nuevo y el ciclo continúa. El resultado es una serie de franjas horizontales en la corteza oceánica, en las que alternan minerales magnetizados hacia el norte y minerales imantados hacia el sur, una versión geológica de los anillos de los árboles. Se datan las franjas

CONCEPTOS BASICOS

- Se venía creyendo que los puntos calientes volcánicos, tales como el que está creando actualmente las islas Hawai, eran puntos fijos en el lento movimiento de las placas tectónicas que forman la capa más externa de la Tierra.
- Los nuevos datos nos dicen que los puntos calientes pueden ser móviles. Información obtenida en el estudio del arco de islas de Hawai y volcanes sumergidos extinguidos. La forma acodada de la cadena se atribuía sólo al cambio de dirección del movimiento de la placa del Pacífico. Ahora se cree que en parte se debe a la migración del punto caliente, expresión a su vez de movimientos en el manto terrestre.
- Este hallazgo obliga a cambiar los libros texto y hace ver de manera distinta los registros paleoclimáticos y la estabilidad de la Tierra entera respecto a su eje de rotación.

INTERPRETACION RECIBIDA SOBRE EL ORIGEN DE HAWAI

Los libros de texto explican que la cadena compuesta por las islas Hawai y las montañas submarinas del Emperador (*derecha*) se formó a medida que la placa tectónica del Pacífico se desplazaba sobre un punto caliente fijo. La emisión de lava construyó una isla, la placa desplazó la isla hacia el NO y otra ocupó su lugar (*abajo*). El brusco cambio de trayectoria se atribuyó a una modificación del movimiento de la placa. Pero hemos obtenido pruebas que denuncian el carácter incompleto de tal explicación. Si las cosas fueran así, la geometría de la cadena, por ejemplo, coincidiría con la predicha a partir del estudio de los puntos calientes de las cuencas del Índico y el Atlántico (*línea discontinua*).



KEVIN HAND

comparándolas con la cronología de las inversiones de la polaridad. Con los datos de tiempo y distancia se calcula la dirección y velocidad de una placa respecto a su adyacente.

La segunda técnica se basa en la dirección del campo magnético terrestre, que tiene dos componentes: horizontal (declinación) y vertical (inclinación). Cuando se consulta una brújula para hallar el norte, se usa la declinación, pero si observamos con detenimiento la aguja, comprobaremos que también se ladea, ligeramente, respecto a la horizontal. Neil Opdyke, de la Universidad de Florida, demostró en un estudio clásico, de finales de los sesenta, que la inclinación guarda una relación directa con la latitud. La inclinación revela la latitud a la que originalmente se formó la roca y, por consiguiente, la distancia mínima recorrida por la placa desde entonces (lo que no revela es la longitud).

Estos métodos no proporcionan trayectorias inequívocas. El campo magnético terrestre no establece tan sólo el norte y el sur. Tiene una forma más compleja que, se cree, concuerda con el flujo del hierro fundido en el núcleo de la Tierra. Sin embargo, cuando se promedia a lo largo de varios milenios, las desviaciones se anulan. En consecuencia, los investigadores pueden compensar la complejidad del campo magnético reuniendo múltiples muestras de roca que abarquen un intervalo de tiempo largo. Existen pocas islas donde hallar rocas de suficiente antigüedad; no cabe más remedio que perforar el suelo oceánico.

Se trata de un proceso que presenta sus propias complicaciones. La corteza oceánica puede estar inclinada, lo que induce errores en la medición de la inclinación magnética. Las mejores muestras de roca proceden de regiones que, según confirman los datos sísmicos, se han mantenido planas. Los científicos sólo han perforado en profundidad algunas de estas regiones. Otro método de obtención de datos consiste en remolcar un magnetómetro con un barco y tomar medidas remotas de la magnetización de las rocas del fondo marino. Por desgracia, las medidas no sólo reflejan la magnetización registrada durante la formación de las rocas, sino que recogen también las magnetizaciones inducidas por el campo magnético actual, al igual que la magnetización adquirida a lo largo del tiempo geológico cuando algunos de los dominios magnéticos de los cristales se reorientan de modo espontáneo. En breve, hay que calibrar las lecturas de los magnetómetros por medio de muestras recogidas directamente.

Latitud no coincidentes

El primer indicio que el punto caliente de Hawai podía no ser fijo se halló a principios de los años setenta, en estudios dirigidos por Tanya Atwater y Peter Molnar, adscritos al Instituto de Tecnología de Massachusetts. Para deducir

El autor

John A. Tarduno ha realizado últimamente una expedición al nordeste de Mauritania para recoger muestras de roca de 200 millones de años de antigüedad —sus señales magnéticas revelan el movimiento de las placas a lo largo de los tiempos— y a la isla Chatham de Nueva Zelanda, esta vez para obtener rocas de 85 millones de antigüedad. Es profesor de la Universidad de Rochester, donde fundó el laboratorio de paleomagnetismo.

el movimiento de la placa, se centraron en dos fenómenos: las franjas del fondo marino y los arcos insulares. Cuando dos placas se encuentran en una dorsal mesooceánica, sus movimientos crean una serie de franjas en el fondo marino y, si cada placa yace sobre un punto caliente, un par de arcos insulares. Se puede predecir el trazado de un arco insular generado por un punto caliente en una placa observando el trazado del arco correspondiente en la otra placa.

Atwater y Molnar constataron que las predicciones de varios trazados no coincidían con la localización de algunos volcanes reales. Parecía que los puntos calientes se habían movido. Andando el tiempo, Joann Stock y su equipo, del Instituto de Tecnología de California, perfeccionaron el procedimiento, con resultados muy similares. Las predicciones para la cadena de Hawai-Emperador basadas en los puntos calientes del océano Atlántico concuerdan en rasgos generales con la parte de la cadena formada a lo largo de los últimos 30 millones de años, aunque no con la formada en un pasado más lejano. Las desviaciones en las formaciones de hace 60 millones de años son muy grandes.

Sin embargo, estas conclusiones no convencieron a muchos geólogos. Otros efectos podían explicar la discordancia entre los dos grupos de datos. Las cuencas del Atlántico y el Pacífico están conformadas por placas que colindan con el continente de la Antártida, que a su vez está constituido por dos placas, al menos. Estas placas pueden girar como las ruedas de un engranaje; la dirección de las formaciones del Atlántico podría así haber cambiado con respecto a las del Pacífico. Por desgracia, gran parte de la historia geológica de la Antártida, oculta bajo gruesos casquetes de hielo, sigue envuelta en el un misterio. Esta incertidumbre impidió que se realizase una reconstrucción total de los movimientos de las placas.

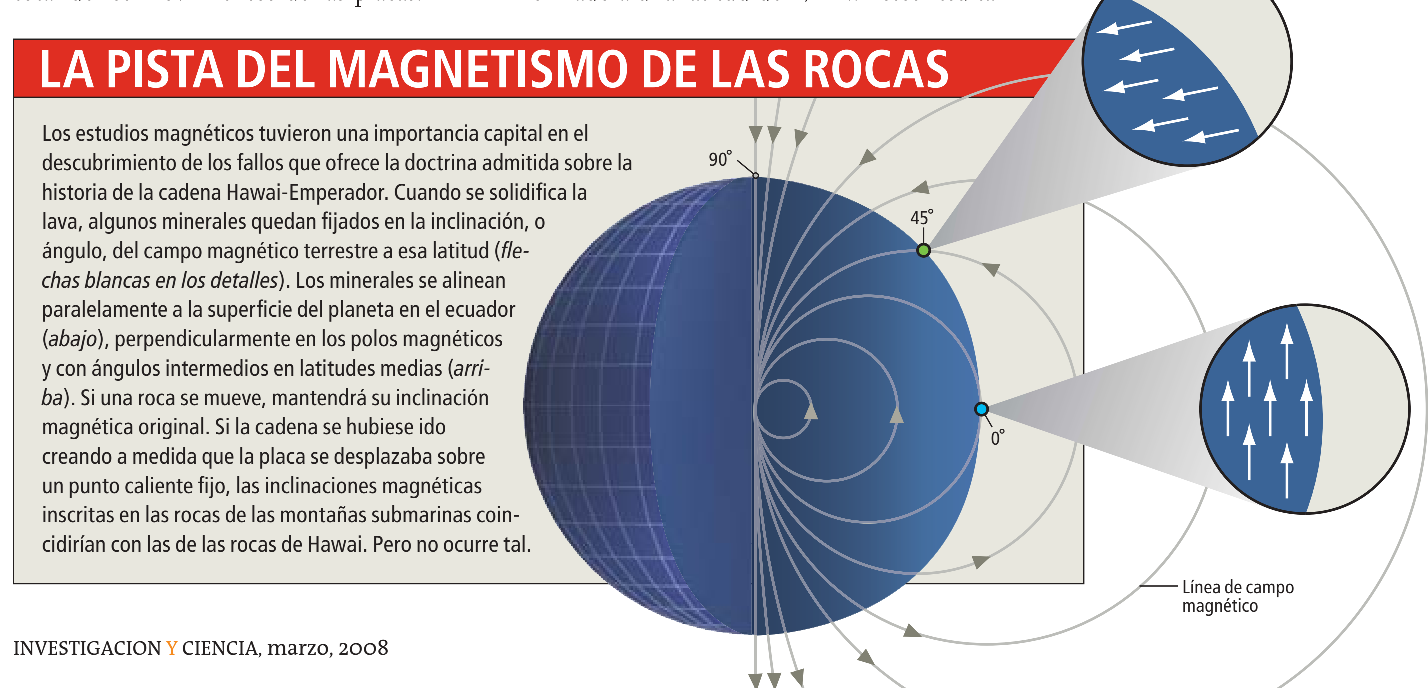
El único modo de dirimir la cuestión era volver a las muestras de roca. Rory Cottrell, de la Universidad de Rochester, y el autor del artículo se propusieron esa tarea en 1995. Visitamos la sede del Programa de Perforaciones Oceánicas de la Universidad A&M de Texas. Examinamos testigos de sedimentos y roca reunidos a lo largo de varias décadas. El más prometedor se había extraído en 1992 del Detroit, uno de los montes submarinos de la cadena Emperador, que se formó hace entre 81 y 75 millones de años. El tipo de roca era basalto, parecido al de las erupciones actuales de la Isla Grande de Hawai; el basalto contiene el tipo de señales magnéticas que mejor se entiende. Ese testigo de sondeo no había llamado mucho la atención porque se creía que era demasiado corto para proporcionar lecturas precisas de la inclinación magnética.

Un nuevo análisis probó que no era así. Con el fin de eliminar los efectos de la magnetización inducida y la reorientación espontánea de grandes dominios minerales magnéticos, y poder así identificar la magnetización original, examinamos las muestras en un magnetómetro blindado tipo SQUID (dispositivo superconductor de interferencia cuántica). Acometimos un exhaustivo proceso de desmagnetización. El resultado fue que el testigo tenía longitud suficiente para proporcionar lecturas cabales de la inclinación magnética, y por tanto de la latitud, a la que se formaron los minerales: 36 ºN.

Comparamos nuestro nuevo resultado con un estudio realizado en 1980 por Masaru Kono, del Instituto de Tecnología de Tokio, dentro del Proyecto de Perforaciones Marítimas Profundas, predecesor del Programa de Perforaciones Oceánicas. Tomó muestras del monte Suiko, en la cadena del Emperador, de 61 millones de años de antigüedad, y determinó que se había formado a una latitud de 27 ºN. Estos resulta-



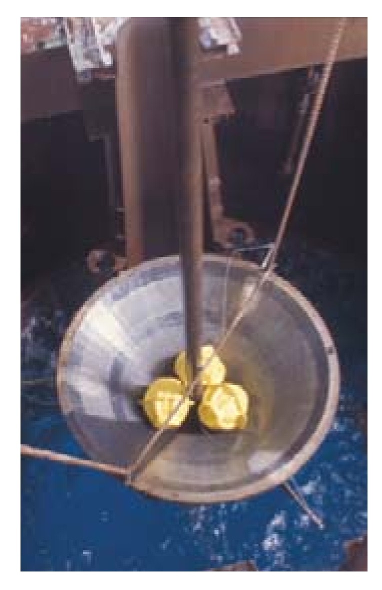
▲ **2. LA TORRE DE PERFORACION instalada en la cubierta del *JOIDES Resolution* lleva a las profundidades del mar y recupera de allí el largo tubo de perforación (*primer plano*) con el que el autor y su equipo extrajeron muestras de roca de montañas submarinas.**



LA PISTA DEL MAGNETISMO DE LAS ROCAS

Los estudios magnéticos tuvieron una importancia capital en el descubrimiento de los fallos que ofrece la doctrina admitida sobre la historia de la cadena Hawai-Emperador. Cuando se solidifica la lava, algunos minerales quedan fijados en la inclinación, o ángulo, del campo magnético terrestre a esa latitud (*flechas blancas en los detalles*). Los minerales se alinean paralelamente a la superficie del planeta en el ecuador (*abajo*), perpendicularmente en los polos magnéticos y con ángulos intermedios en latitudes medias (*arriba*). Si una roca se mueve, mantendrá su inclinación magnética original. Si la cadena se hubiese ido creando a medida que la placa se desplazaba sobre un punto caliente fijo, las inclinaciones magnéticas inscritas en las rocas de las montañas submarinas coincidirían con las de las rocas de Hawai. Pero no ocurre tal.

CORTESIA DE JOHN A. TARDUNO (*perforadora*); KEVIN HAND (*ilustración*)



▲ **3. EL CONO se envía al fondo marino a través de una abertura en el centro del *JOIDES Resolution*. Este tipo de conos ayuda a situar el tubo de perforación que subirá los testigos de roca a bordo para su análisis magnético.**

dos eran sorprendentes. Si el punto caliente de Hawai, en la actualidad situado a una latitud de 19 ºN, hubiese permanecido fijo, el Detroit y el Suiko se habrían formado a la misma latitud. Los tres valores de la latitud diferían, lo que sugería que la cadena Emperador reflejaba el trayecto de una pluma del manto que se movía. Sin embargo, nuestros colegas recibieron los resultados con la más absoluta indiferencia. Todas nuestras miles de medidas de laboratorio se reducían a sólo dos puntos en un gráfico. Los escépticos necesitaban más, antes de poner en tela de juicio la explicación de manual de la cadena hawaiana: el movimiento de la placa y sólo de la placa.

Ventaja

A finales de 1997, Cottrell y el autor comenzaron a pensar en una nueva campaña de perforaciones oceánicas. Para seleccionar los puntos de sondeo contamos con la ayuda de David Scholl, de la Universidad de Stanford. Invitamos a participar en la expedición a Bernhard Steinberger, que había modelizado el flujo del manto para su tesis doctoral en Harvard. El verano de 2001 nos embarcamos en el *JOIDES Resolution,* del Programa de Perforaciones Oceánicas. La expedición Leg 197, de dos meses de duración, nos llevó a tres de las montañas submarinas de la cadena Emperador: Detroit, Nintoku y Koko.

Antes de perforar, se efectuaron prospecciones sísmicas para garantizar que obtendríamos lava procedente de capas planas. Se eliminaba así una fuente de errores. Cuando tuvimos las muestras a bordo, un equipo de expertos nos ayudó a analizarlas: Robert Duncan, de la Universidad estatal de Oregon, Thorvaldur Thordarson, de la de Hawai en Manoa, Frederick Frey, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, y Clive Neal, de la Universidad de Notre Dame. Para estimar la edad de las rocas, examinamos los microfósiles de los sedimentos depositados sobre la lava o intercalados. El barco dispone de un laboratorio de magnetismo en el que calculamos la magnetización de la roca. La confirmación de nuestros hallazgos requeriría de un trabajo posterior de varios meses en laboratorios establecidos en tierra, en el que serían de importancia fundamental los análisis geocronológicos por medio de isótopos. Sin embargo, cuando volvimos al puerto de Yokohama, ya nos habíamos hecho una idea general bastante clara.

Resultaba palmario que el punto caliente se desplazó rápidamente hacia el sur. Su velocidad, deducida del período comprendido entre los 81 y los 47 millones de años de antigüedad, era de más de 4 centímetros al año, equiparable a la del movimiento de las placas tectónicas. No encontramos depósitos coralinos ni en el Detroit ni en el Nintoku, y sólo escasos restos en el Koko, lo que corrobora nuestros hallazgos. Si esas montañas se hubieran formado en la latitud tropical de Hawai, habríamos esperado encontrar arrecifes coralinos en sus inmediaciones.

Las consecuencias empiezan ahora a manifestarse en las ciencias de la Tierra. Se responden viejas preguntas y se plantean nuevas incógnitas. Por ejemplo, otro indicador geológico de la latitud es el tipo de sedimentos depositados en los fondos oceánicos. Cerca del ecuador, los sedimentos son ricos en esqueletos planctónicos de carbonato cálcico, que se acumulan gracias a la elevada productividad biológica de la región. Fuera de la zona ecuatorial, los sedimentos son pobres en carbonatos. Los sedimentos en

CORTESIA DE JOHN A. TARDUNO (*cono*); KEVIN HAND (*ilustración*)

LO QUE REALMENTE SUCEDIO

El estudio del magnetismo mostró que las montañas submarinas se originaron a latitudes cada vez más bajas: el Detroit se formó a unos 36 ºN y el Koko a unos 22 ºN. Aunque la explicación recibida sobre la cadena Hawai-Emperador sostenía que el punto caliente se mantuvo fijo mientras la placa del Pacífico se desplazaba sobre él (*izquierda*), ahora queda claro que el punto caliente también migró (*derecha*) hacia el sur (el tamaño de las flechas representa la velocidad relativa).

ARRASTRADO POR EL MANTO



El descubrimiento de que los puntos calientes pueden desplazarse nos obliga a revisar la explicación recibida en torno a su naturaleza. Se mantiene, no obstante, su definición: constituyen los extremos superiores de las plumas del manto que se originan cerca del límite entre el núcleo fluido de la Tierra y el viscoso manto suprayacente. En el modo tradicional (*izquierda*), las plumas permanecen fijas con respecto al interior más profundo. De acuerdo con el nuevo modelo (*derecha*), la convección del manto las mece. La base de la pluma se puede mover, tal y como puede apreciarse en la película de earth.unimuenster.de/dyn/plumedynamics.html.

KEVIN HAND

los testigos del océano Pacífico de más de 50 millones de años de antigüedad no son lo ricos en carbonato que se esperaría si los puntos calientes fueran fijos. Josep M. Parés y Ted C. Moore, de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, hallaron hace poco que esta paradoja se resolvería si el punto caliente de Hawai se estuviera desplazando hacia el sur.

Los geólogos quizá deban reescribir sus manuales también en lo que respecta a Norteamérica. Se sabe que grandes extensiones del oeste americano no se formaron donde están ahora. Esas masas imponentes fueron empujadas hacia su posición actual por las placas que otrora componían la cuenca del océano Pacífico. Las interacciones entre las placas continental y oceánica también son responsables de la creación de macroformaciones geológicas, entre ellas las Montañas Rocosas. Sin embargo, las interacciones entre las placas se han deducido a partir de una hipótesis: el punto caliente de Hawai era un punto de referencia fijo. Puesto que no lo es, los geólogos deberán revisar la explicación del mecanismo de formación de Norteamérica.

Polos

A mayor escala, el movimiento de los puntos calientes afecta a la doctrina admitida sobre la migración polar, el giro de toda la parte sólida del planeta con respecto al eje de rotación terrestre. "Migración polar" es una expresión confusa en geofísica, ya que da a entender que se desplaza el polo. En realidad, lo mismo el eje de rotación que el magnético se mantienen casi fijos en el espacio absoluto; los que migran son los continentes y los fondos oceánicos. La subducción de las placas tectónicas podría modificar la distribución de la masa en la Tierra y causar un desequilibrio de fuerzas. Para reequilibrarse, todo el planeta rotaría. En un caso extremo, Florida se desplazaría hasta el polo norte y Groenlandia se convertiría en una isla tropical. Este proceso difiere de la tectónica de placas porque en él no cambian las posiciones relativas de las placas.

En el decenio de los ochenta, se partía del carácter fijo de los puntos calientes para reconstruir los movimientos de las placas y situar las antiguas posiciones de la masa terrestre respecto a su eje de rotación. Los datos sugerían que la masa terrestre había migrado 20 grados respecto al eje a lo largo de los últimos 130 millones de años. Nuestros hallazgos rebaten tal afirmación: se han movido los puntos calientes, no toda la Tierra. Los puntos calientes pueden ser una falsa referencia para el movimiento de las placas y la migración polar.

El punto caliente podría estar enraizado en el manto más profundo y aun así podría moverse su base; y el flujo del manto podría doblar la pluma ascendente. Con mayor radicalidad, es el propio concepto de pluma lo que se pone en cuestión. Don Anderson, del Caltech, ha defendido que las plumas del manto quizá no enraícen en el manto inferior; serían fenómenos someros, que emergerían del manto superior o las capas subcorticales. Otros consideran que las plumas tienen tamaños y formas variados y se originan a distintos niveles del interior del planeta.

Aunque nuestros descubrimientos sobre la movilidad de los puntos calientes han sido de largo alcance, ello no significa que tengamos que poner en entredicho la doctrina geológica recibida. La ciencia rara vez funciona así. El punto caliente de Hawai está, pese a todo, muy cerca del ideal imaginado por Wilson y Morgan. Pero no está fijo en el manto más profundo. Placas y puntos calientes se mueven. El problema estriba ahora en determinar la contribución de ambos movimientos. Hay que prestar más atención a la infravalorada agitación del manto.

Bibliografía complementaria

FIXED HOTSPOTS GONE WITH THE WIND. Ulrich Christensen en *Nature*, vol. 391, n.º 847, págs. 739-740; 26 de febrero, 1998.

THE EMPEROR SEAMOUNTS: SOUTHWARD MOTION DE THE HAWAIAN HOTSPOT PLUME IN EARTH'S MANTLE. John Tarduno et al. en *Science*, vol.301, págs. 1064-1069; 22 de agosto, 2003.

GEOPHYSICS — HOTSPOTS COME UNSTUCK. Joann Stock en *Science*, *ibid*., págs. 1059-1060.

El instrumento musical humano

Ingo R. Titze

A juzgar por su tamaño, no parece que nuestro aparato fonador pueda sonar como un instrumento musical. ¿Cómo logran los cantantes producir sonidos tan extraordinarios?

CONCEPTOS BASICOS

- Aunque el aparato fonador humano es de dimensiones reducidas, produce sonidos tan variados y hermosos como los que generan los instrumentos musicales.
- Todos los instrumentos cuentan con una fuente sonora, un resonador que amplifica el sonido básico y un elemento emisor que transmite a los oyentes el sonido.
- La fuente de sonidos humanos reside en las cuerdas vocales de la laringe; el amplificador corresponde al conducto aéreo situado sobre la laringe; el emisor, a la abertura de la boca.
- La voz humana logra crear una rica gama de sonidos merced a fenómenos no lineales, que transforman pequeñas variaciones en efectos desproporcionadamente grandes.

En una feria de instrumentos musicales, el aparato fonador humano pasaría inadvertido ante la mirada de los visitantes. Si los instrumentos se agruparan, por ejemplo, por tamaño, la laringe (o "caja de voz") y la vía aérea en la que se asienta, se expondrían junto al flautín (*piccolo*), entre los más diminutos generadores de sonidos musicales. Sin embargo, un cantante experimentado es capaz de competir con todos los instrumentos de creación humana, no sólo con cada uno de ellos por separado, sino también con una orquesta entera. Las investigaciones sobre el modo en que la voz genera al cantar tan notable gama de sonidos han revelado que la acción coordinada de los elementos del aparato fonador alcanza una complejidad sorprendente.

Durante más de medio siglo, el canto se ha explicado mediante la teoría lineal de la acústica del habla. Supone ésta que la fuente de sonido y el resonador (o amplificador) operan de forma independiente [*véase* "La acústica del canto", por Johan Sundberg; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, mayo de 1977]. Sabemos ahora que en la generación de la voz, las interacciones no lineales (aquellas en las que la fuente y el resonador se nutren uno de otra) desarrollan una función de suma importancia. Esa nueva comprensión del fenómeno vocal arroja luz sobre el modo en que los cantantes producen tan asombrosos sonidos.

Teclas musicales

Las insuficiencias y limitaciones estructurales del aparato fonador humano saltan a la vista en cada uno de sus componentes. La emisión de sonidos musicales exige la acción de tres elementos básicos: una fuente, un resonador y un emisor. La fuente vibra en el seno del aire y genera con ello una onda sonora; ésta se caracteriza por una frecuencia fundamental que determina el tono (altura tonal) y un conjunto de frecuencias superiores, o harmónicos, que definen el timbre (color) de la voz. Los resonadores refuerzan la frecuencia fundamental mediante la intensificación de la vibración. La superficie u orificio emisor transfiere el sonido al medio exterior y, por fin, al auditorio.

En el caso de una trompeta, por ejemplo, los labios del músico vibran al pasar velozmente entre ellos el aire que bombean los pulmones. Esa vibración se recoge en una boquilla con forma de copa (embocadura) para generar una frecuencia fundamental y varias frecuencias superiores (armónicos). Los tubos metálicos del instrumento actúan a modo de resonadores; el extremo abierto del tubo, la campana, emite el sonido. Para modificar la frecuencia fundamental, el trompetista altera la tensión de los labios y pulsa los pistones, que modifican la longitud eficaz de los tubos. En un violín, las cuerdas, al vibrar, crean las notas; la cavidad central, las dos tapas de madera y



AARON GOODMAN

1. LA VOZ HUMANA muestra una versatilidad sorprendente. Con un equipo físico de tamaño reducido, crea sonidos de gran riqueza y complejidad.

los aros de cierre proporcionan la resonancia; las "efes" (aberturas en *f* en la tapa) facilitan la transferencia del sonido al aire circundante.

El canto humano, en cambio, se basa en la vibración de los pliegues, o cuerdas, vocales: el paso del aire a su través genera las frecuencias sonoras. Las cuerdas vocales constan de dos pequeños grupos de tejido especializado, unas protuberancias fláccidas que sobresalen de las paredes de la laringe. Generan una frecuencia fundamental cuando oscilan rápidamente: entran en contacto unas con otras, se separan y vuelven a entrar en contacto. La glotis (el espacio que media entre las cuerdas) se abre y se cierra. El vestíbulo laríngeo, un conducto aéreo situado justo sobre la laringe, opera a modo de boquilla: acopla el sonido a la porción restante del resonador, el tracto vocal. Los labios emiten el sonido hacia el exterior de igual forma que la campana de una trompeta.

A los ojos de un lutier, las cuerdas vocales, que tienen en conjunto el tamaño de la uña del pulgar, no parecen capaces de generar sonidos musicales de gran riqueza. Además de su tamaño limitado, ofrecen un aspecto demasiado blando y esponjoso para sostener la vibración y crear una variedad de tonos.

La naturaleza, el fabricante de instrumentos biológicos, podría responder que, si bien los pliegues son diminutos, el efecto resonador de las vías aéreas amplifica el sonido de la laringe de forma notable. Pero este argumento probablemente tampoco resultaría convincente para el lutier: el tubo aéreo típico se extiende sólo entre 15 y 20 centímetros por encima de la laringe, y entre 12 y 15 por debajo, no más que la longitud de un *piccolo*. El resto del cuerpo contribuye poco o nada a la resonancia. Los instrumentos de viento con un registro tonal similar al de la voz humana (trombones, trompetas y fagotes) constan de tubos más largos. Los tubos, la campana y los pistones de una trompeta, por ejemplo, suman una longitud total de unos dos metros; los de un trombón, alrededor de tres.

La fuente sonora

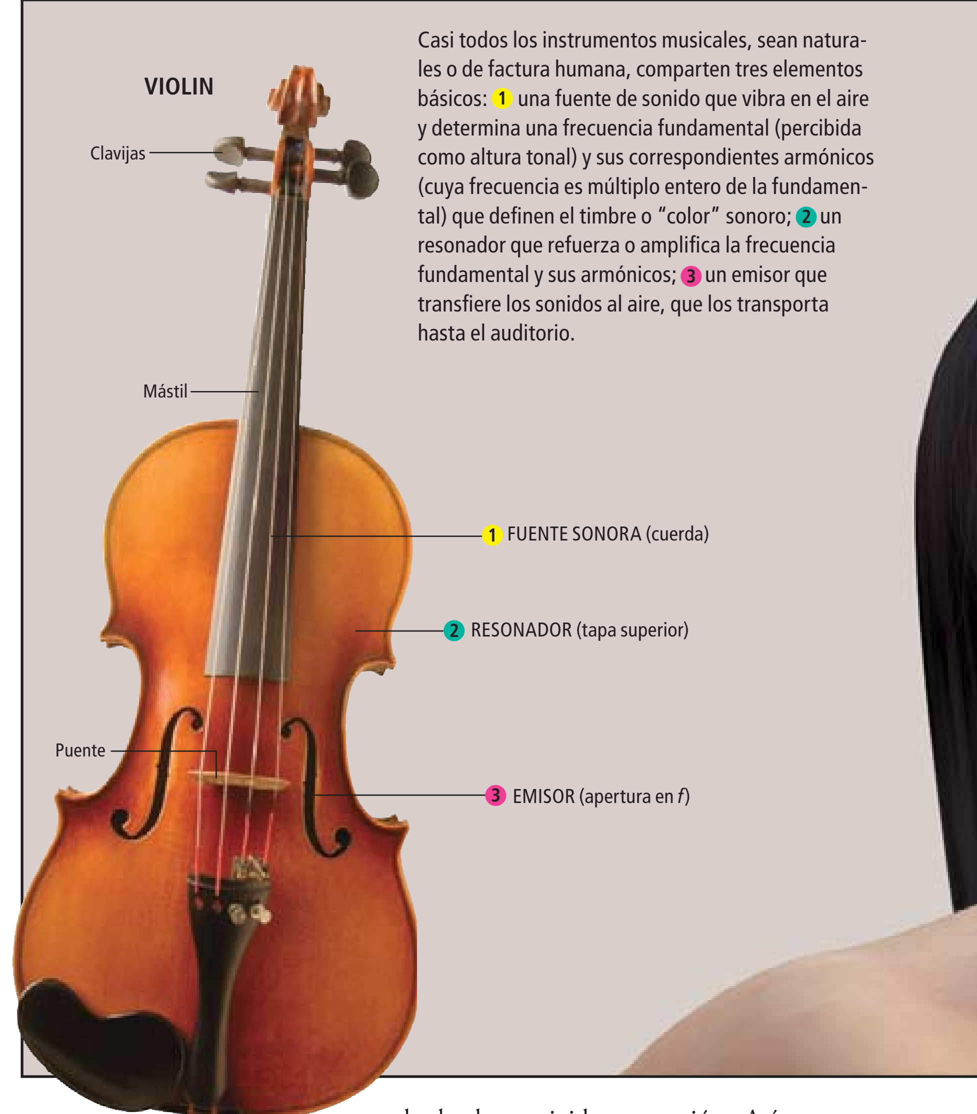
Para comprender el modo en que la naturaleza ha desarrollado las cuerdas vocales, veamos primero los requisitos que debe cumplir una fuente sonora. Para que una lengüeta o una cuerda sostenga su vibración ha de estar hecha de un material elástico, es decir, que recupere su forma tras haberse deformado. La elasticidad se mide en términos de rigidez (o, recíprocamente, flexibilidad) o tensión: una lengüeta presenta rigidez a la flexión y una cuerda vibra cuando se halla en tensión.

En general, las frecuencias de vibración de una fuente sonora están en relación con la raíz cuadrada de su rigidez o tensión. Así, para lograr que una cuerda de acero de una longitud dada duplique su frecuencia de vibración (para que su tono se eleve una octava), es necesario cuadruplicar su tensión. Esa condición limita la gama de frecuencias que se obtienen mediante la modificación de la tensión o la rigidez de una fuente.

Felizmente para el ejecutante, existe otra forma de cambiar la frecuencia de vibración de una fuente: modificar la longitud del elemento oscilante (alargar o acortar). En el caso de una cuerda, las frecuencias son inversamente proporcionales a la longitud del segmento vibrante. El violinista, al fijar uno de los extremos de la cuerda sobre el mástil presionándola con el dedo, selecciona unas frecuencias. Si la longitud vibrante de una cuerda se reduce a la mitad sin modificar su tensión, la frecuencia de vibración se duplica. Para aumentar el registro tonal, un mismo instrumento suele contar con varias cuerdas.

ASI PRODUCEN MUSICA LOS INSTRUMENT

Casi todos los instrumentos musicales, sean naturales o de factura humana, comparten tres elementos básicos: 1 una fuente de sonido que vibra en el aire y determina una frecuencia fundamental (percibida como altura tonal) y sus correspondientes armónicos (cuya frecuencia es múltiplo entero de la fundamental) que definen el timbre o "color" sonoro; 2 un resonador que refuerza o amplifica la frecuencia fundamental y sus armónicos; 3 un emisor que transfiere los sonidos al aire, que los transporta hasta el auditorio.



STEVE DIBBLEE *iStockPhoto*

ACUSTICA NO LINEAL

Se solía explicar la generación de la voz y el funcionamiento del aparato fonador humano mediante una serie de procesos lineales, es decir, procesos cuyos efectos son proporcionales a las señales que se les suministran (representables, pues, por una línea recta). En fecha más reciente, se ha descubierto que la voz humana presenta un comportamiento no lineal con retroalimentación positiva: pequeñas variaciones producen efectos desproporcionadamente grandes.

OS

APARATO FONADOR HUMANO

3 EMISOR (boca)
Cavidad bucal
Faringe (garganta)
2 RESONADOR (vía aérea)
Laringe
1 FUENTE SONORA (cuerdas vocales)
Tráquea

El autor

Inge R. Titze es profesor del departamento de audiología y patología del habla de la Universidad de Iowa. Dirige el Centro Nacional de la Voz y el Habla en el Centro Denver de Artes Escénicas. Se doctoró en física en la Universidad Brigham Young en 1972. También es profesor de canto.

En los instrumentos de cuerda existen, pues, tres procedimientos para cambiar la frecuencia de la vibración (altura tonal): modificar la longitud de la cuerda, modificar su tensión o saltar a otra cuerda. La tensión de las cuerdas suele ajustarse mediante las clavijas a las que van arrolladas; una vez afinadas, las cuerdas conservan la tensión prefijada. Los músicos casi nunca manipulan a la vez longitud y tensión.

Versatilidad vocal

Los cantantes, en cambio, para variar el tono (frecuencia) de su voz recurren a lo que ningún otro instrumento de cuerda hace: modifican de forma simultánea la longitud y la tensión del elemento vibrante. Para modificar la longitud de una cuerda vocal, nos servimos de músculos que desplazan los extremos de ésta. Ahora bien, para aumentar la frecuencia y cantar una nota más aguda, qué debemos hacer: ¿alargar o acortar las cuerdas vocales? Se podría razonar a favor de uno y otro de esos ajustes; la frecuencia de vibración crece con la disminución de la longitud de las cuerdas y también con el aumento de la tensión de éstas.

La fórmula que expresa la frecuencia de vibración de una cuerda sujeta por sus dos extremos y sometida a tensión establece que, para obtener el máximo aumento de frecuencia, debe aumentarse la tensión (o, más exactamente, el esfuerzo de tracción, el cociente entre la fuerza tensora y el área transversal de la cuerda) y, al propio tiempo, disminuir su longitud.

¿Qué material ofrece tan peculiares propiedades mecánicas? En general, el aumento del esfuerzo de tracción de un material se logra sólo al estirarlo (pensemos en una tira de goma: al tirar de sus extremos, se tensa).

Así pues, el aumento de la frecuencia sonora plantea un conflicto entre longitud y tensión. La naturaleza ha resuelto el problema mediante la combinación de tres tejidos, un

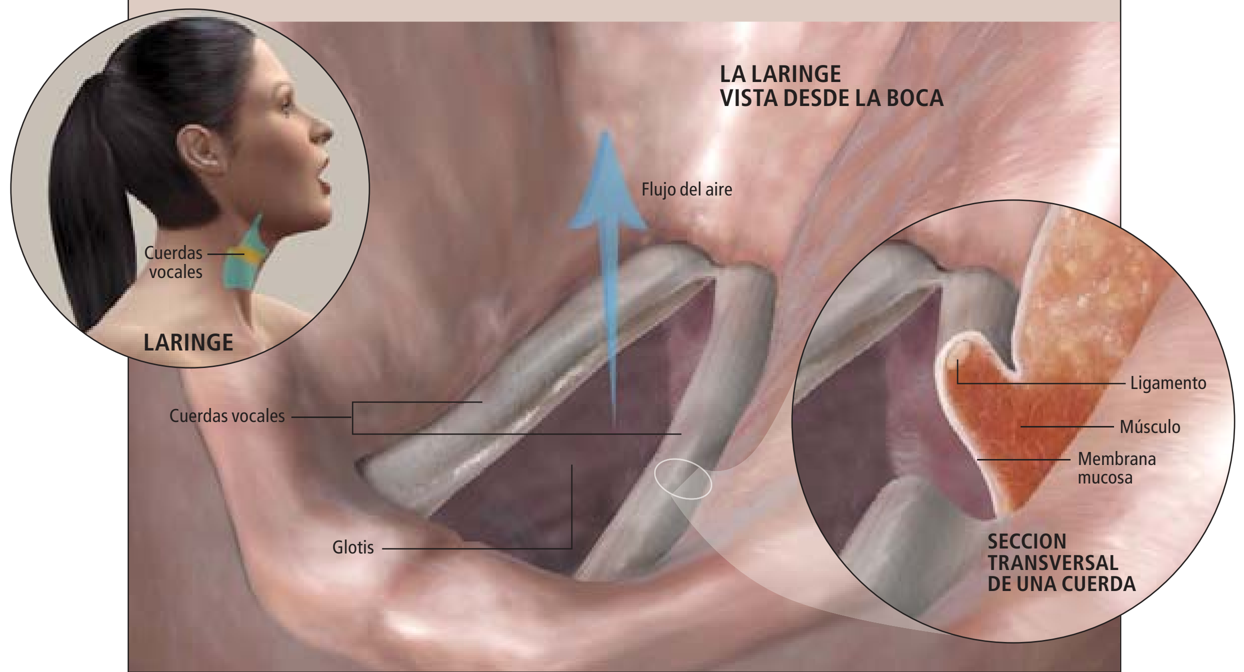


2. STEVEN TYLER, cantante de rock, es famoso por su capacidad para gritar sin desafinar. La voz líder de Aerosmith crea sonidos extremos valiéndose de efectos acústicos no lineales.

GEORGE PIMENTEL *WireImage/Getty Images (Tyler)*; ADAM QUESTELL *(ilustración)*

ASI OPERAN LAS CUERDAS VOCALES

Las cuerdas (o pliegues) vocales alojadas en la laringe, constituyen nuestra fuente sonora. A diferencia de las cuerdas del violín, poseen una estructura compleja, en tres capas, que nos faculta para generar un intervalo de frecuencias que cubre varias octavas. En el núcleo de cada cuerda se halla un ligamento filiforme (*sección transversal*) incrustado en músculos de contracción voluntaria. El conjunto se halla recubierto por una membrana mucosa flexible. Cada componente le aporta al conjunto una habilidad especial. El esfuerzo de tracción del ligamento aumenta rápidamente con su elongación (mediante músculos que desplazan los cartílagos que se hallan anclados a las cuerdas); ello permite la producción de frecuencias superiores. El músculo de la cuerda aumenta el esfuerzo de tracción conforme se contrae. Al hacerlo, se amplía más todavía la gama de frecuencias. La superficie suave y flexible de la membrana exterior, cuya oscilación, al pasar sobre ella el aire exhalado por los pulmones, recuerda el flameo de una bandera al viento, intercambia energía vibratoria con el flujo aéreo; y de ese modo se generan las ondas sonoras.





3. ETHEL MERMAN, cantante de Broadway, emitía un sonido tan articulado y proyectado, que el público podía oírla sin necesidad de altavoces. Ese timbre de voz se logra mediante la reactancia inercial del tracto vocal, que refuerza el segundo armónico (doble de la frecuencia fundamental).

sistema complejo sin par en los instrumentos de cuerda. Uno de los componentes de ese material sonoro corresponde a un ligamento, que guarda semejanza con una cuerda, de ahí que los pliegues vocales se denominen “cuerdas vocales”. Se ha demostrado mediante ensayos biomecánicos que el esfuerzo de tracción aumenta de forma no lineal en ese ligamento si se estira sólo un poco: puede parecer fláccido cuando es corto, pero muestra una tensión notable al ser estirado. Basta aumentar su longitud de 10 a 16 milímetros para que su tensión interna se multiplique por 30.

A tenor de la relación cuadrática antes mencionada, la razón entre la nueva frecuencia y la inicial sería ligeramente superior a 5 (la raíz cuadrada de 30, para ser precisos). Pero al aumentar la longitud del ligamento en un 60 por ciento, la nueva frecuencia también debe dividirse entre 1,6. Ello reduce la razón de frecuencias a una relación de 3 a 1: alrededor de una octava y media en términos musicales. Ese es el rango de frecuencias en el que casi todos nosotros hablamos o cantamos. Sin embargo, el registro de algunos cantantes virtuosos abarca entre cuatro y cinco octavas: un fenómeno extraordinario, según los expertos.

Cuerdas complejas

El segundo elemento que amplía el registro tonal de las cuerdas vocales corresponde a un material que aumenta su tensión *al contraerse*: el tejido muscular. Las contracciones internas de las fibras musculares aumentan la tensión entre las extremidades de una cuerda vocal, incluso cuando ésta se acorta. Alrededor del 90 por ciento del volumen de la cuerda vocal corresponde a tejido muscular. Para facilitar el cambio de tono, la naturaleza ha desarrollado un grupo de cuerdas contiguas, como en un laminado, en el que algunas capas poseen propiedades contráctiles y otras no.

Ahora bien, ¿cómo se puede mantener en vibración ese tejido complejo, si no es posible curvarlo o pulsarlo repetidamente en el interior de la laringe? La única fuente de energía disponible para deformar las cuerdas e inducir así su vibración (como una bandera que

BETTMANN/CORBIS (*Merman*); ADAM QUESTELL (*ilustración*)

flamea al viento) es el aire que exhalan los pulmones. Un músculo y un ligamento, solos, serían demasiado rígidos para desarrollar tales vibraciones al pasar el aire sobre su superficie. Para que se produzca esa oscilación activada por el aire se requiere un tejido de superficie suave, flexible y que responda al flujo aéreo mediante la generación de ondas como las que forma el viento sobre la superficie del mar [*véase* "La voz humana", por Robert T. Sataloff; Investigación y Ciencia, febrero de 1993].

Las cuerdas poseen una tercera capa que se encarga de dicha transferencia energética: una membrana mucosa que se tiende sobre la combinación de músculo y ligamento. Esa mucosa, que consta de un fino epitelio provisto de una sustancia semifluida por debajo, se deforma con facilidad y genera "ondas de superficie". Se ha demostrado matemáticamente que las ondas inducidas por el flujo de aire sostienen la vibración. Debido a ese movimiento de pandeo, parece que el tejido repliega su parte inferior hacia la superior, de donde su nombre de "pliegue" vocal.

Cantar con las cuerdas vocales

¿Cómo logra ese sistema ternario emitir notas tan precisas y a lo largo de varias octavas? Tan sólo con mucha experiencia y destreza. El cantante debe hacer frente a la amenaza de las frecuencias naturales (o de vibración libre), que compiten para ser las dominantes. Esa competición puede producir ronquera, cambios bruscos de registro u otros efectos caóticos [*véase* "Los cantores diafónicos de Tuva", por Theodore C. Levin y Michael E. Edgerton; Investigación y Ciencia, noviembre de 1999].

En el caso de notas graves e intensidades sonoras entre moderadas y fuertes, el cantante activa la musculatura de las cuerdas vocales y pone en vibración todas las capas. Las cuerdas vocales son cortas; la nota está determinada en gran medida por la tensión muscular. En ese caso, la mucosa y el ligamento se encuentran ambos relajados; sirven, sobre todo, para propagar las ondas de superficie que mantienen la oscilación. Para reducir el volumen sonoro en el registro grave, el músculo deja de vibrar y se utiliza para ajustar la longitud de las cuerdas vocales. La frecuencia está determinada por la elasticidad conjunta de la mucosa y el ligamento. Para las notas agudas, el cantante elonga las cuerdas vocales; la tensión del ligamento dicta la frecuencia, mientras que la mucosa porta la onda de superficie.

La inervación y el sistema de control de los músculos laríngeos que coordinan esas tensio-

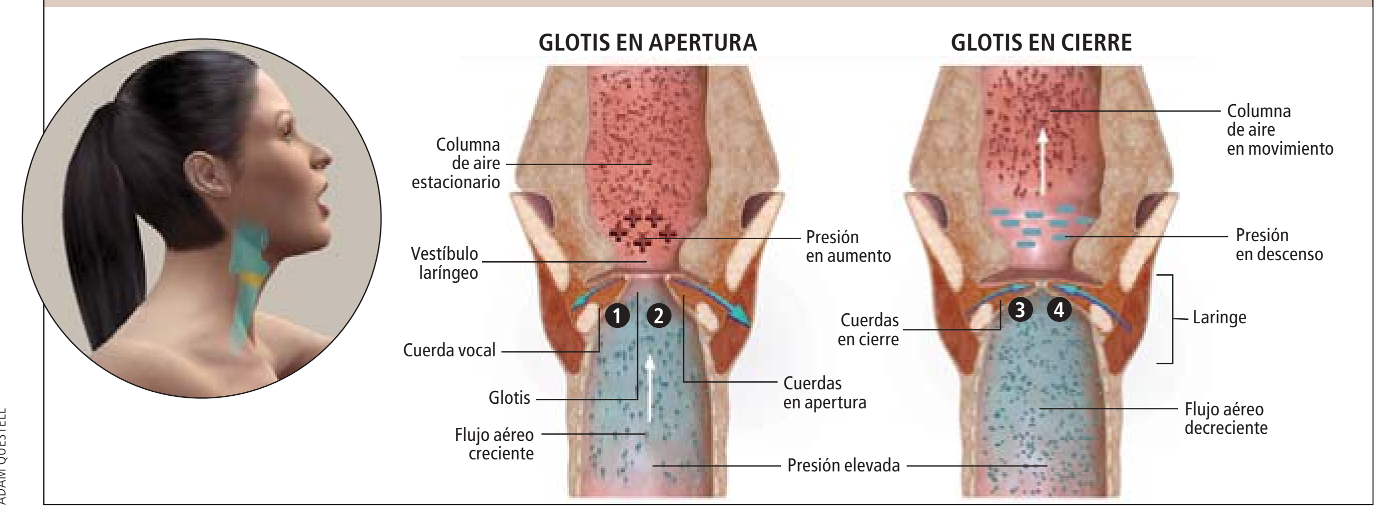
¿LO SABIA?

Tendemos a pensar que el instrumento musical humano corresponde a todo el cuerpo, de tamaño comparable a un contrabajo. Pero la mayor parte del cuerpo no contribuye —de forma directa— a la generación de las ondas sonoras (ni el pecho, ni la espalda, ni el abdomen, ni las nalgas ni las piernas). Todo el sonido se crea en la laringe y las vías aéreas.

AMPLIFICACION DEL SONIDO EN LAS VIAS AEREAS

Los cantantes se valen de un proceso no lineal de retroalimentación energética en el vestíbulo laríngeo (el conducto aéreo situado por encima de la laringe) para provocar la resonancia, o amplificación, del sonido creado por las cuerdas vocales. Ese proceso de reactancia inercial se da cuando los cantantes crean condiciones especiales en el vestíbulo, de forma que proporcionan un "impulso" adicional y sincronizado en cada apertura y cierre de las cuerdas vocales, reforzando así su vibración y creando ondas sonoras de mayor intensidad.

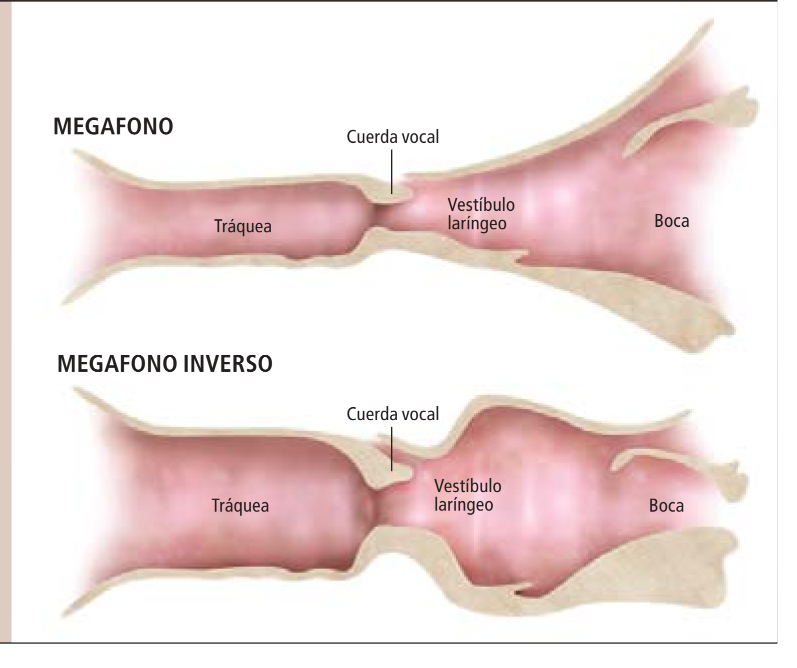
El impulso entra en acción cuando se produce un desfase entre el movimiento de la columna de aire que ocupa el vestíbulo y el movimiento de las cuerdas vocales. Cuando las cuerdas vocales comienzan a separarse al principio de una oscilación ❶, el aire expelido por los pulmones fluye en el espacio de glotis que media entre las cuerdas y empuja a la columna inmóvil de aire del vestíbulo. La inercia de la columna de aire estacionario hace que su presión aumente en la glotis, con lo que las cuerdas se separan más todavía ❷. Entonces los pulmones comienzan a acelerar hacia arriba la masa de aire. Conforme se eleva esa masa de aire, la recuperación elástica de las cuerdas las lleva a juntarse y cerrar la glotis, cortando el flujo de aire exhalado por los pulmones ❸. Esas respuestas generan en la glotis un vacío parcial, responsable de que las cuerdas ❹ se cierren con fuerza. De ese modo, lo mismo que los impulsos sincronizados mecen un niño en un columpio, la reactancia inercial (la acción de empujar y estirar) sobre el aire del vestíbulo laríngeo aumenta cada vaivén de las cuerdas vocales, creando resonancia.



ADAM QUESTELL

BOCAS COMO MEGAFONOS

El tracto vocal, a modo de resonador, adopta formas determinadas para proyectar mejor ciertas notas y sus armónicos. Para potenciar las notas agudas, los cantantes suelen abrir la boca al máximo. Esa disposición en "megáfono" guarda semejanza con la forma de una trompeta (*arriba*): las cuerdas vocales y el vestíbulo laríngeo vendrían a ser la boquilla; la boca correspondería a la campana. En otros estilos de canto, el tracto vocal adopta la forma de un "megáfono invertido": vestíbulo laríngeo estrecho, faringe expandida al máximo y boca entreabierta (*abajo*).





nes para producir la frecuencia y el volumen sonoro deseados, muestran una notable complejidad. Los músculos laríngeos externos a las cuerdas vocales regulan con precisión los cambios de longitud del pliegue vocal. Durante esas manipulaciones, la calidad de la voz puede alterarse de forma brusca, dando lugar a un cambio de registro o una diafonía involuntaria. Ello se debe a una regulación inadecuada de la tensión del pliegue vocal (por exceso o por defecto) en la contracción del músculo. Algunos intérpretes utilizan la diafonía para crear efectos sonoros curiosos, basados en el contraste de dos sonidos (recuérdese el *jodeln*, el típico canto tirolés). Sin embargo, cuando ese cambio de registro se produce de forma involuntaria, resulta embarazoso para el cantante, pues delata una falta de control del instrumento.



Vías aéreas resonantes

El tamaño de los instrumentos musicales viene determinado, sobre todo, por las dimensiones del resonador. Los cantantes se las arreglan con un resonador de sólo medio litro, que, a pesar de esa restricción, opera con suma eficacia.

En un instrumento musical, maderas, placas, tambores, campanas y tubos refuerzan y amplifican las frecuencias que genera la fuente sonora. En el violín, las cuerdas se apoyan sobre un puente que conecta con la tapa superior, cuidadosamente conformada para que vibre por simpatía a muchas de las mismas frecuencias naturales que las cuerdas producen; las refuerza, por ende. La masa de aire comprendida entre las placas superior e inferior oscila también a las frecuencias naturales de las cuerdas. En numerosos instrumentos de viento, sean de metal o de madera, el tubo (con sus válvulas o pistones) se diseña para que sintonice con muchas de las frecuencias fuente, cualquiera que sea la nota tocada.

Todos los sonidos continuos constan de frecuencias fuente armónicamente separadas; es decir, múltiplos enteros (2:1, 3:1, 4:1...) de la frecuencia fundamental. Esa ley física exige que el resonador sea lo bastante grande como para acomodar un espectro de frecuencias extenso. Por ello, los tubos de una trompeta tienen entre 1,2 y 2 metros de longitud, los del trombón se estiran entre 3 y 9 metros, y los de la trompa admiten un desarrollo de 3,7 a 5,2 metros.

La naturaleza es tacaña con la longitud del resonador del cantante. La longitud total del conducto aéreo humano que cubre las cuerdas vocales es de unos 17 centímetros. La frecuencia mínima que resuena en esa cavidad es de unos 500 Hz (ciclos por segundo); la mitad de ese valor cuando se entonan ciertas vocales, como [u] e [i]. Dado que el tubo del tracto vocal está casi cerrado por un extremo, resuena sólo en los múltiplos impares (1, 3, 5...) de la frecuencia mínima de resonancia. Así pues, ese tubo tan corto causa la resonancia simultánea sólo de los armónicos impares de una frecuencia fuente de 500 Hz (500 Hz, 1500 Hz, 2500 Hz...). Y dado que el tracto vocal no modifica la longitud del tubo con válvulas o correderas (salvo uno o dos centímetros, si hacemos sobresalir los labios o bajamos la laringe) tal parece que las capacidades de nuestro resonador sufren limitaciones inexorables.



4. JOAN SUTHERLAND, gran dama de la ópera, sabía que determinadas vocales dificultan la entonación de ciertas notas. La soprano australiana cambiaba algunas vocales en las piezas operísticas (hasta el punto de pronunciar mal las palabras) para facilitar la afinación.

IRA NOWINSKI *Corbis* (*Sutherland*); ADAM QUESTELL (*ilustración*)

Resonancia en un tubo corto

Una vez más, los efectos no lineales (interacción no lineal entre los elementos del sistema) salvan la situación. En lugar de reforzar cada armónico mediante una resonancia específica de tubo (caso, por ejemplo, de los tubos de un órgano, cada uno de los cuales hace resonar ciertos armónicos), nuestro breve tracto vocal refuerza de forma simultánea todo un conjunto de armónicos mediante un proceso de retroalimentación energética. El tracto vocal almacena energía acústica durante una parte del ciclo de vibración y luego, en otro momento más ventajoso, la reintegra a la fuente; da un "impulso" a cada ciclo de oscilación de las cuerdas vocales, de modo que aumenta la amplitud de la vibración. Si trasladamos la escena a un columpio, esos impulsos cíclicos vendrían a ser como los empujones, cuidadosamente sincronizados, que refuerzan la amplitud (el recorrido de ida y vuelta) del movimiento del columpio.

El mejor instante para el impulso llega cuando el movimiento de la columna de aire en el tubo se retrasa con respecto al movimiento de las cuerdas vocales. En tal caso se dice que la columna de aire presenta reactancia inercial (respuesta lenta o perezosa ante la aplicación de una presión). La reactancia inercial contribuye profundamente a mantener la oscilación que induce el flujo de aire en las cuerdas vocales.

Cuando las cuerdas vocales comienzan a separarse en el inicio de un ciclo de vibración, el aire procedente de los pulmones empieza a fluir dentro del espacio de glotis que media entre ellos; empuja la columna de aire estacionario situada justo encima en el vestíbulo laríngeo. Conforme la columna de aire se acelera hacia arriba para facilitar la entrada de aire nuevo en el espacio que deja en pos, aumenta la presión del aire, en la glotis y sobre ella. Ese aumento de presión empuja y separa todavía más las cuerdas. Cuando, en virtud de la recuperación elástica, las cuerdas retornen desde las paredes, con tendencia a cerrar la glotis, aminora o cesa el flujo de aire que la atraviesa. Sin embargo, la columna de aire continúa desplazándose hacia arriba por inercia, dejando un vacío parcial en el interior de la glotis y sobre ella; provoca, por succión, que las cuerdas se junten con mayor fuerza. De ese modo, igual que los impulsos sincronizados aumentan la oscilación del columpio, la reactancia inercial del aire del tracto vocal aumenta cada vaivén de las cuerdas vocales mediante una acción de tira y empuja.

Aun así, el tracto vocal no sigue de manera automática ese comportamiento inercial para todas las figuras vocales. Es tarea del cantante ajustar la forma del tracto vocal (mediante la selección cuidadosa de las vocales más cómodas), para que la reactancia inercial se experimente sobre casi todo el rango de notas. Una tarea nada fácil.



ETHAN MILLER *Corbis*

5. LUCIANO PAVAROTTI, gran tenor italiano, era famoso por el brillo y la belleza de su timbre. Lograba una voz rica en armónicos mediante una fina sintonización en su garganta de la reactancia inercial no lineal.

Boca en megáfono

Los distintos estilos de canto se basan en formas del tracto vocal diferentes, que hacen uso óptimo de la reactancia inercial. Al producir la vocal [æ] (en las palabras del inglés *mad* o *apple*), el tracto vocal adopta la forma de un megáfono: glotis ligeramente cerrada y boca muy abierta. Las voces masculinas se valen de la reactancia inercial a frecuencias que pueden alcanzar los 800 o 900 Hz; las femeninas, hasta un 20 por ciento más. En las notas agudas, al menos dos frecuencias armónicas logran reactancia inercial; en las notas graves, un número mayor. En consecuencia, una técnica para aumentar la potencia de las notas agudas consiste en abrir la boca al máximo, como se hace al cantar a plena voz o gritar. Cuando el tracto vocal adopta esa configuración de megáfono, su forma recuerda a la de un cornetín (que carece de tubo arrollado y de pistones, aunque sí tiene campana o cuerno).

Otra configuración vocal que refuerza la vibración de las cuerdas vocales con reactancia inercial es la de megáfono invertido: vestíbulo laríngeo ("boquilla") estrecho, faringe (la parte de la garganta situada justo detrás de la boca y la cavidad nasal) expandida al máximo y boca entreabierta. Es la que adoptamos al pronunciar la vocal [u]. En la interpretación de música clásica, la técnica del megáfono invertido resulta ideal para desarrollar el registro medio de las voces femeninas y el registro agudo de las voces masculinas.

Durante su formación, el estudiante de canto aprende a ampliar las zonas de su registro donde el tracto vocal proporciona reactancia inercial para las frecuencias fuente, en todas las notas y para varias vocales. Aprende también a timbrar la voz, lo que se logra mediante la combinación de vestíbulo laríngeo estrecho y faringe ancha. Se utilizan términos como "cubrir" la voz "o volverla del revés" para describir el proceso de adoptar la conformación vocal que mejor potencia la reactancia inercial de las frecuencias fuente; se logra así mayor resonancia y, por tanto, una voz más timbrada.

El canto se funda en el potencial acústico que ofrece la biología humana. Merced a la investigaciones sobre los elementos y los insospechados modos de funcionamiento del aparato fonador humano, estamos adquiriendo una comprensión cada vez más honda del modo en que los virtuosos del canto desarrollan su arte. Cantantes y científicos se beneficiarán de esa cooperación y estudio continuados.

Bibliografía complementaria

THE PHYSICS OF SMALL-AMPLITUDE OSCILLATION OF THE VOCAL FOLDS. I. R. Titze en *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 83, n.º 4, págs. 1536-1552; 1988.

ACOUSTIC SYSTEMS IN BIOLOGY. Neville H. Fletcher. Oxford University Press, 1992.

VOCAL TRACT AREA FUNCTIONS FROM MAGNETIC RESONANCE IMAGING. B. Story, I. Titze y E. Hoffman, en *Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 100, n.º 1, págs. 537-554; 1996.

PRINCIPLES OF VOICE PRODUCTION. Reimpresión. I. R. Titze. National Center for Voice and Speech, 2000.

THE PHYSICS OF MUSICAL INSTRUMENTS. Segunda edición (corregida de la quinta impresión). N. H. Fletcher y T. D. Rossing. Springer, 2005.

Abrasión y desgaste

Mediante un simple proceso de frotamiento de un cuerpo contra otro obtenemos superficies de gran lisura

Marc Boada Ferrer

Un hallazgo temprano en la historia de la técnica fue el del proceso de abrasión. Mediante el simple frotamiento de dos piedras con la interposición de un abrasivo —arena en suspensión acuosa—, se obtuvieron las hachas pulidas típicas del Neolítico. Hoy, con esmeril (Al_2O_3), carburo de silicio (SiC), diamante y otros abrasivos, pueden erosionarse, en minutos, varios milímetros de material, por duro que sea.

La ciencia experimental requiere del concurso de componentes de fina precisión dimensional. Pensemos en el fulcro de una balanza mecánica, una lente o una sección delgada de un mineral. Tales elementos exigen, además, un perfecto acabado superficial, que se consigue con la abrasión y el pulido.

El abrasivo consta, por lo común, de pequeños granos, poliedros minúsculos e irregulares con aristas que se clavan en el material tratado. En esos puntos se originan grietas y microfracturas, que terminan, si el sustrato es vítreo y duro, en formaciones concoideas; si el abrasivo opera sobre un metal, en cambio, se arrancan las finas virutas características de los sólidos plásticos y fluentes.

En cualquier caso, la rugosidad final de la superficie dependerá siempre del tamaño del grano, siendo éste, el de la malla del tamiz con el que se obtiene. Así, una granulometría del n.º 100 corresponde a un tamiz de idéntico número de hilos por pulgada (una pulgada equivale a 25,4 milímetros) y, por tanto, a partículas de tamaño máximo de 0,25 milímetros. Los abrasivos más finos del mercado poseen un tamaño de partícula de 0,5 micrometros, que corresponde a un grano aproximado del n.º 50.000. Se comercializan en los formatos más variados. El material de partida corresponde al abrasivo en grano (que puede adquirirse en botes de tamaño variable o a granel). Este se adhiere a diversos sustratos, con lo que se obtienen papeles y láminas abrasivas. También se aglomera con resinas, metales y gomas para producir muelas abrasivas, discos de corte, sierras de cinta y brocas grandes.

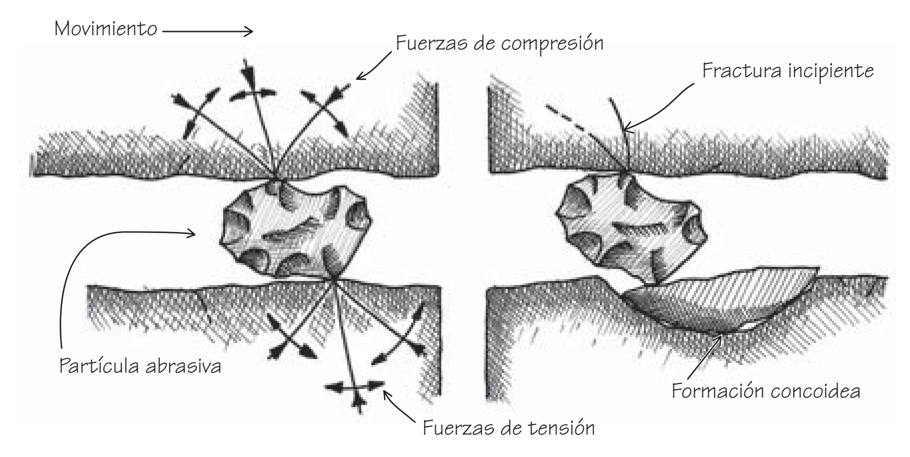
El abrasivo en grano constituye un excelente aliado del investigador experimental. Mediante un surtido básico de 5 o 6 granulometrías, desde el n.º 80 al 1200, pueden llevarse a cabo múltiples tareas. Un sencillo ejercicio práctico nos mostrará el modo en que se conduce el desgaste. Veamos cómo el esmeril en grano permite obtener pantallas de retroproyección con gran poder de resolución.

Cortemos una pieza de cristal de unos 100 × 100 milímetros de lado y unos 3 o 4 milímetros de espesor. Preparemos una base plana, que utilizaremos para esta y otras tareas de planeado. Servirá una pieza de vidrio algo mayor que esta revista, del mayor espesor posible, que colocaremos sobre una madera plana interponiendo una capa de franela. Prepararemos luego una papilla con el abrasivo (esmeril del n.º 400 o 600), agua y unas gotas de jabón líquido; la extenderemos con un pequeño pincel sobre la herramienta. Colocaremos encima la placa cuadrada de cristal y empezaremos a frotar.

Observaremos que, debido a la presión irregular que ejercen nuestras manos, el desgaste no es homogéneo, ni se inicia al mismo tiempo en todos los puntos. Para evitar que la pantalla se deforme, trataremos de repartir nuestra presión y desplazaremos el cristal en distintas direcciones: realizaremos movimientos en forma de "ocho" o de "doble uve"; además, rotaremos la pieza cada 10 o 20 carreras.

Procuraremos que los movimientos sean constantes, para garantizar (por la ley de los grandes números) un promediado de los errores y las deformaciones. Esta es precisamente una de las virtudes de la abrasión: la rápida obtención de superficies regulares. Se consigue una pieza de cristal deslustrado donde pueden proyectarse las imágenes de un microscopio o de un comparador de perfiles. La acción que hemos realizado corresponde a un simple esmerilado. Pero las operaciones de abrasión típicas pasan por tres fases: desbastado, alisado y pulido.

Para ensayar esos tres pasos, recurriremos a un elemento abrasivo que nos resultará familiar: un tejido o una película de plástico recubierto de abrasivo, más conocido por "papel de lija". En la ferretería encontraremos la versión común (gramaje 200 o 300), apta para acabados en madera o metal. Otros productos más refinados se basan en óxidos metálicos, carborundum (carburo de silicio) o, mejor, diamante. Los papeles de lija "de agua" deben utilizarse siem-



1. Acción abrasiva de las partículas sobre cristal según J. Strong.

pre con lubricante (agua o aceite); se comercializan en una amplia gama de granulometrías: desde el grano 40 al 50.000, o más.

Aplicaremos el papel de lija en la preparación de una muestra metalográfica. Tomemos y seccionemos verticalmente un fondo de crisol de cobre (el resto de cobre que queda en el fondo de un crisol que se ha utilizado para fundir este metal), enfriado lentamente. Pongamos una hoja de lija del grano 60 o 80 sobre el cristal plano que ya hemos utilizado antes (la fijaremos con adhesivo removible en vaporizador). Previa aplicación de unas gotas de aceite, procederemos al desbaste de la probeta (o muestra). Dado que la lisura no es relevante, tampoco habrá que tomar precauciones para impedir un desgaste irregular; bastará con imprimir a la pieza un movimiento similar a una eme mayúscula, utilizando el papel en toda su extensión.

Repitamos la acción con la pieza rotada 90º respecto de la posición inicial; aplicaremos el papel de lija de grano 120 hasta que desaparezcan las marcas dejadas anteriormente. Alisaremos luego con los gramajes 240, 360, 500, 600, 800, 1000 y 2000: obtendremos así una superficie cuasi especular, ligeramente convexa. Si proseguimos de forma gradual hasta el gramaje n.º 12.000, la superficie quedará muy bruñida, lista para un pronto abrillantado con disco rotatorio de algodón y pasta de acabado. Por fin, un ataque químico con alcohol metílico al 1 o 2 por ciento de ácido nítrico nos mostrará una bella estructura cristalina.

De la misma forma en que hemos preparado la superficie de cobre, se obtienen secciones pulidas de maderas y carbones vegetales; en esos casos, se utiliza aire comprimido como lubricante. También pueden seccionarse y pulirse dientes, huesos y, en general, materiales que no sean demasiado duros ni muy blandos. En cada caso, utilizaremos los abrasivos adecuados. Verbigracia, los filtros o prismas de cristales de sal gema (dureza 1 en la escala de Mohs) se pulen con discos de abrillantado de óxido de cerio de un gramaje superior al 10.000 y se lubrican con agua saturada de sal común en disolución.

Hasta aquí nos hemos centrado en la obtención de superficies planas. Pero la abrasión se aplica también al corte, taladro, contorneo, facetado y generación de cuerpos esferoides y paraboloides, por citar unos ejemplos. Para la operación más básica, el corte, resulta óptimo el disco diamantado. Ese elemento, antaño exótico, se ha difundido merced a la aplicación del diamante sintético. Se dispone de un amplio abanico de productos diamantados entre los que destacan sierras de disco; varían según el tamaño del grano, la fijación al disco, la geometría de éste y la friabilidad.

La friabilidad de un abrasivo corresponde a la capacidad de reavivado por fractura superficial (al romperse lentamente cada uno de los granos, aparecen nuevas aristas, listas para seguir erosionando). Mediante el ajuste de la friabilidad durante la síntesis de los cristales de carbono, se obtienen diamantes artificiales de gran poder abrasivo.

Los discos diamantados facilitan la sección de rocas muy duras, el contorneo de discos espesos de cristal y el facetado de cuchillas de carburo de tugsteno. En mi trabajo utilizo un cortador de azulejos (herramienta común en albañilería) equipado con discos diamantados. Si bien modesto, ese equipo resulta eficaz en las etapas preliminares de procesos más complejos. Por botón de muestra: la obtención de una lámina delgada de una roca o fósil, una técnica rutinaria en paleontología y petrología.

Nos proponemos, pues, obtener una sección angosta que permita el paso de la luz (a menudo polarizada) y, por tanto, la observación microscópica por transparencia. Mediante un disco diamantado, rebajaremos la muestra hasta lograr un plano con la orientación adecuada. Sujetaremos la muestra con las manos (para lo que deberemos ejercer una presión notable) y limpiaremos con agua el residuo que se produce. Tomando la faceta como plano de referencia, cortaremos luego una rebanada de 3 o 4 milímetros de espesor; la fijaremos sobre un disco de latón mediante lacre o, mejor, brea, calentados al baño maría. Después, puliremos la cara, grano a grano, emulando el proceso metalográfico anterior (desplazaremos la muestra por toda la herramienta para evitar un desgaste irregular).

A continuación, despegaremos la probeta por inmersión en agua caliente. La secaremos y la pegaremos, por la cara

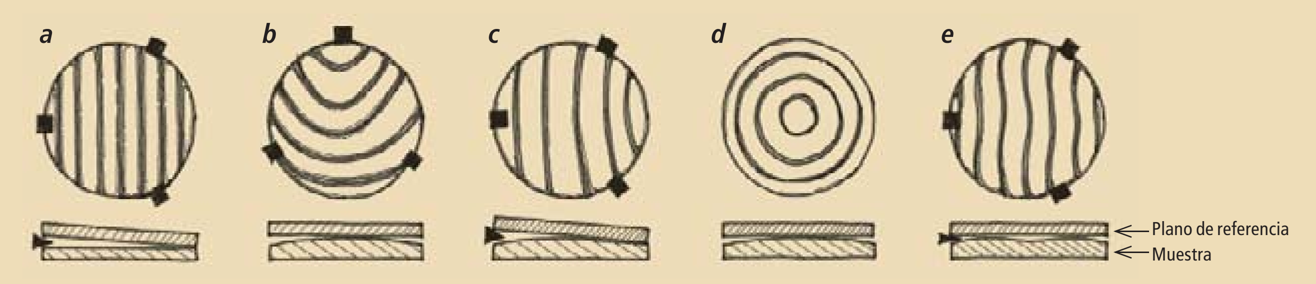
PANOPLIA DE MATERIALES PARA ABRASION Y DESGASTE



1 Discos diamantados de corte
2 Discos diamantados para contorneado
3 Discos diamantados para facetado (grano 600)
4 Broca tubular diamantada
5 Disco de latón y vidrio para esmerilado
6 Corindón natural (n.º 80)
7 Esmeril (n.º 800)
8 Oxido de cerio para pulido
9 Broca dentada para esmeril
10 Papel de lija de agua (del n.º 500 al 2000)
11 Lija sobre tela ultrafina (del n.º 1500 al 12.000)
12 Tarjetas metálicas diamantadas (n.º 150, 300 y 600)
13 Láminas plásticas diamantadas (n.º 8000, 14.000 y 50.000)
14 Discos para lapeado en óxido de cromo, aluminio, cerio y estaño
15 Limas diamantadas
16 Discos de tela diamantados ultrafinos (del n.º 8000 al 100.000)
17 Pasta de abrillantado para metales
18 Pasta de diamante (n.º 1200)
19 Pastas de abrillantado en barra para metales blandos
20 Discos de algodón y fieltro para metales

MARC BOADA FERRER

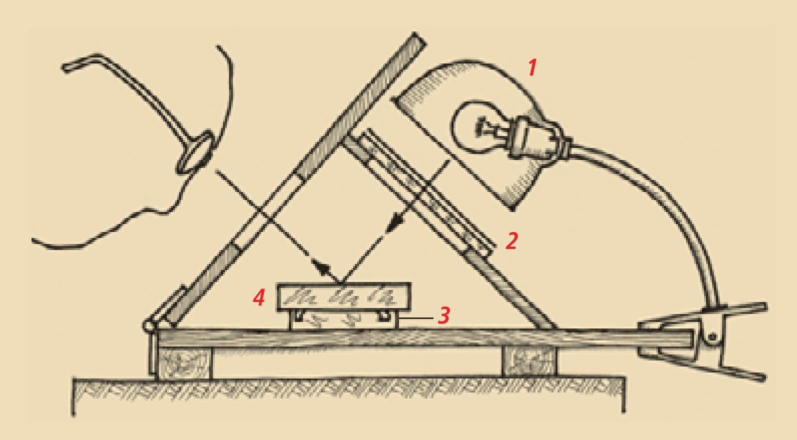
CONTROL DE CALIDAD: LOS ANILLOS DE NEWTON



Franjas de Newton para distintas geometrías: superficie plana (*a*), cilíndrica (*b*), esférica inclinada (*c*), esférica (*d*) y con depresión central (*e*).

Los procesos de abrasión generan superficies de gran lisura. Si queremos controlar la calidad de las mismas deberemos usar métodos de precisión; dejamos, pues, de lado los instrumentos mecánicos tradicionales, que ofrecen precisiones de sólo un micrometro. Se prefieren los métodos ópticos, basados en la interferencia de ondas luminosas.

Quizás el interferómetro de construcción más sencilla sea el que describía Russell W. Porter en las páginas de *Scientific American* en los años veinte del siglo pasado. Aportemos una versión ligeramente modificada de ese instrumento: la luz de un manantial cualquiera (*1*) atraviesa un filtro rojo e ilumina un difusor (*2*); a continuación, esas ondas luminosas se reflejan primero en la superficie que pretendemos examinar (*3*) y, luego, en una cara plana de calidad contrastada (transparente), el plano de referencia (*4*), que colocaremos siempre encima de la muestra. Entre la muestra y el plano de referencia se interponen tres pequeñas tiras de papel de seda o de periódico; mediante el ajuste de una de ellas, crearemos una cuña de aire, donde interferirán los trenes de onda incidentes y reflejados. Se genera así un patrón de interferencia característico: los anillos de Newton. Dado que esas figuras son un reflejo fiel de las deformaciones de la superficie examinada, permiten al experimentador detectar las zonas prominentes y dirigir la abrasión hacia éstas, hasta igualarlas con las zonas hundidas.



La precisión de esos aparatos viene definida por la longitud de onda (λ) de la luz con la que se trabaja. Cada franja iluminada u oscura del patrón de interferencia responde a una distancia de media onda entre las caras examinadas. Por ejemplo, si colocamos un cristal perfectamente plano (plano de referencia) sobre otra superficie ligeramente esférica (muestra), iluminamos con luz roja (λ = 650-700 nanómetros) y contamos los anillos concéntricos que aparecen, podremos determinar, para cada punto de la muestra esférica, la distancia al plano de referencia y, por tanto, el radio de curvatura y la topografía. Y todo ello con una precisión superior al micrometro.

pulida, sobre un portaobjetos; usaremos adhesivo para retrovisores. Será ahora el cristal del portaobjetos el que uniremos al disco de latón, también con brea. Rebajaremos la muestra con cautela (con un grano fino de 220 o 320), hasta hacerla translúcida. Por fin, bruñiremos la superficie con pulimentos ultra finos (papel diamantado del grano 50.000).

Esa última fase de bruñido, o abrillantado, es con mucho la más delicada. Además, el producto que ofrece un pulido óptimo es distinto en cada caso. Podemos recurrir a los líquidos, pastas y abrillantadores que acostumbran emplear marmolistas, carroceros, ópticos y lapidarios. Ensayaremos primero cuál es el producto más adecuado para el material que pretendamos mecanizar. A título de ejemplo, abrillantaremos metales y plásticos con un disco de algodón rotatorio y pasta de trípoli o piedra pómez. Para el vidrio y materiales muy tenaces, donde la precisión resulta esencial, utilizaremos óxido de cerio, cromo, estaño o, mejor aún, rojo inglés (óxido férrico anhidro) para recubrir el disco rotatorio (torta) donde se producirá el abrillantado. También ese sustrato dependerá del material que queramos pulir; podemos ensayar el uso de discos de plomo, cera, brea, papel o fieltro, que tornaremos rígidos con soportes de cristal o latón.

Lamentablemente, la obtención de una sección pulida implica la destrucción de una fracción notable de la fuente. Cuando deseemos evitar la operación de corte, para minimizar el impacto de nuestro trabajo (en el estudio de un árbol o de un hueso de dinosaurio, por ejemplo), optaremos por la extracción de un testigo cilíndrico. Usaremos para ello una broca cilíndrica hueca: un simple tubo de latón al que habremos aplicado un dentado basto. Montaremos la broca en un taladro de columna que gire a poca velocidad y sumergido en una cubeta con agua y carborundum del n.º 80. Aunque de construcción sencilla, ese dispositivo ofrece eficacia y precisión; constituye el punto de partida para la obtención de diversos componentes ópticos.

MARC BOADA FERRER

Estimaciones

En muchas ocasiones nos tenemos que contentar con respuestas aproximadas. Pero un buen argumento estimativo puede enseñarnos más que la solución exacta de un problema

Juan M. R. Parrondo

¿Cuántos afinadores de piano hay en Chicago? Aunque les cueste creerlo, éste es un problema "clásico" en el gremio de los físicos. No porque haya teorías físicas acerca de la afinación del piano (que las hay), sino porque esta misma pregunta la lanzaba con asiduidad Enrico Fermi, uno de los físicos más relevantes de la primera mitad del siglo XX, a sus alumnos de la Universidad de Chicago. Lo que Fermi pretendía con ello era enseñar una forma de razonamiento extremadamente útil en física y otras ciencias: las estimaciones. Es decir, el intento de abordar un problema no con el objetivo de dar una respuesta exacta, sino sólo aproximada. En este intento no necesitamos conocer todos los datos que conducen a la solución exacta (algo que muy raramente ocurre en ciencias). Podremos hacer hipótesis "razonables", aunque tengamos escasas pruebas de su validez.

Veamos cómo resolvía Fermi su clásico problema. En Chicago hay unos 5 millones de habitantes. En cada hogar hay, de media, dos personas; de modo que tenemos unos 2 millones de hogares. Supongamos que hay un piano en uno de cada 20 hogares (este dato, desgraciadamente, ya ha dejado de ser cierto incluso en orden de magnitud). Hay entonces en Chicago unos 100.000 pianos, que suelen afinarse una vez al año. Por otro lado, podemos suponer que un afinador es capaz de afinar un piano en unas dos horas, incluyendo el transporte. Afinará, en una jornada de ocho horas, unos 4 pianos. Si trabaja 5 días a la semana durante 50 semanas al año, será capaz de afinar, $4 \times 5 \times 50 = 1000$ pianos al año. Por tanto, la afinación de los 100.000 pianos de Chicago requerirá unos 100 afinadores.



1. Enrico Fermi (1901-1954).

Fíjense en la cantidad de hipótesis que hemos realizado a lo largo del argumento, algunas no tan razonables para nuestra época, aunque sí lo eran en los EE.UU. de los años cuarenta. Incluso hemos cometido errores matemáticos de bulto, como afirmar que la mitad de 5 millones es aproximadamente 2 millones. En las estimaciones, todas estas hipótesis y cálculos aproximados son aceptables, puesto que lo que nos interesa es sólo el *orden de magnitud* de la respuesta final. Hemos obtenido 100 afinadores de piano, lo que significa que el número real puede estar, digamos, entre 50 y 150. A pesar de la inexactitud del resultado, la información que aportan las estimaciones es muy valiosa, sobre todo si no hay otra forma de obtener una respuesta más precisa o si para ello se requiere un gran esfuerzo económico o de cálculo. Así lo pensaba Fermi, quien consideraba las estimaciones esenciales en la formación de los físicos. En su honor, los problemas que se abordan mediante métodos estimativos se conocen en muchos foros como *problemas de Fermi.*

Una de las primeras estimaciones célebres fue la de la población de la ciudad de Londres, realizada por el comerciante John Graunt en 1662 a partir de datos de nacimientos y muertes y reseñada recientemente por el historiador I. B. Cohen en su libro *El triunfo de los números*. En la época de Graunt no había un censo de la población total, pero ya se contaba con registros fiables del número de muertes al año y del número de bautizos (muy ligeramente inferior al de nacimientos). En el Londres de finales del siglo XVII, se registraba una media de 12.000 nacimientos al año. Graunt supuso que las mujeres londinenses en edad fértil tenían un hijo cada dos años, lo cual conduce a la cifra de 24.000 mujeres en edad fértil. Suponiendo que el período de fertilidad abarca desde los 16 hasta los 40 años, mientras que la edad de las mujeres casadas varía entre los 16 y los 76 años, concluyó que había:

$$24.000 \times \frac{76-16}{40-16} = 24.000 \times \frac{60}{24} \approx 48.000$$

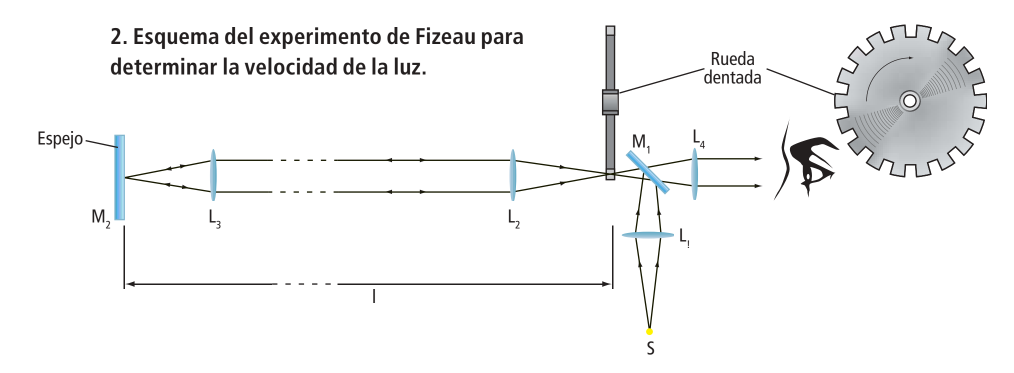
mujeres casadas. Aquí vemos ya una aproximación considerable, puesto que 60 no es el doble de 24. Probablemente Graunt realizó esta corrección para tener en cuenta la pirámide poblacional, más estrecha en las edades avanzadas. Finalmente, Graunt observó que cada unidad familiar londinense tenía una media de 8 miembros: la madre, el padre, tres hijos y tres sirvientes o huéspedes. Por lo tanto, la población total londinense tenía que ascender a unos $48.000 \times 8 = 384.000$ personas.

Graunt confirmó este resultado por otros dos métodos. En primer lugar, observó, a partir de datos de parroquias pequeñas, que se producían de media tres muertes al año por cada 11 familias. Como el número de fallecimientos en todo Londres ascendía a 13.000 anuales, el número total de familias debía ser:

$$13.000 \times \frac{11}{3} \approx 48.000$$

en pleno acuerdo con la estimación basada en los nacimientos. La segunda comprobación se basaba también en el núme-

2. Esquema del experimento de Fizeau para determinar la velocidad de la luz.



ro de muertes. A partir de la densidad de población, estimó que el número de familias que habitaban dentro de las murallas de la ciudad era de 12.000. Por otra parte, sabía que, de todas las muertes que se producían, dos tercios ocurrían extramuros. Por tanto, el número total de familias debía de ser tres veces el número de familias intramuros, es decir 12.000 × × 3 = 48.000.

Los historiadores de la ciencia consideran a Graunt el "padre" de la estadística matemática, por estas estimaciones publicadas en 1662 en un pequeño libro titulado *Observaciones naturales y políticas mencionadas en índice adjunto y basadas en las listas de mortalidad*. Sus contemporáneos también saludaron la obra de Graunt como una importante contribución científica y, a pesar de que poseía escasa formación académica, fue elegido miembro de la Regia Sociedad tras la publicación de su libro.

En el caso de Graunt, la estimación era el único modo de abordar el problema de la población de Londres. En otras ocasiones, las estimaciones pueden servir para diseñar un experimento que luego nos dará una medida precisa de cierta cantidad o para analizar su viabilidad. Son fascinantes los métodos de medida desarrollados para obtener cantidades muy pequeñas o muy grandes, especialmente en sus inicios. ¿Cómo podemos conocer el tamaño de un átomo o el número de moléculas en un gramo de agua? ¿De qué manera una distancia de 10^{-10} metros se traduce en algo mensurable macroscópicamente? Los experimentadores tienen que encontrar la forma de que distancias, tiempos, masas o fuerzas muy pequeñas den lugar a efectos macroscópicos. Veamos un ejemplo.

La luz viaja a unos 300.000 kilómetros por segundo. Ya Rømer, a finales del siglo XVII, obtuvo una estimación bastante precisa de esa cifra observando la diferencia en los períodos de los satélites de Júpiter cuando la Tierra se acerca o se aleja del planeta. Si sabemos que la velocidad es del orden de los 300.000 kilómetros por segundo y queremos realizar una medida directa de dicha velocidad, ¿qué estrategia deberíamos seguir?

Para una medición directa, es decir, una medición del tiempo empleado por la luz en recorrer una cierta distancia, o bien utilizamos distancias muy grandes, como hizo Rømer, y tiempos apreciables, o bien utilizamos distancias cortas y formas muy precisas de medir el tiempo. Fizeau llegó a un compromiso entre estas dos estrategias y realizó el primer experimento de medición directa de la velocidad de la luz en 1849. La idea consiste en enviar pulsos de luz a cierta distancia en donde se coloca un espejo, detectar el pulso que retorna y medir el tiempo empleado en el viaje. Mediante lentes focalizadoras, Fizeau logró enviar el rayo a algo menos de 10 kilómetros de distancia y detectar con precisión el rayo reflejado. El viaje total de la luz sería entonces de 20 kilómetros. Para medir la velocidad de la luz, necesitaríamos entonces medir tiempos del orden de

$$\frac{20}{300.000} \sim 10^{-4} \text{segundos.}$$

¿Era posible medir con precisión un intervalo de tiempo tan pequeño, con los medios de la primera mitad del siglo XIX, puramente mecánicos? Fizeau diseñó un método ingenioso para lograrlo. Construyó un disco dentado con 720 muescas en su circunferencia (*véase la figura*). Podía hacer girar el disco a velocidades bien controladas, hasta unas 15 revoluciones por segundo. Por lo tanto, a esta velocidad máxima, el tiempo entre una hendidura y la siguiente es de

$$\frac{1}{720 \times 15} \approx 10^{-4} \text{segundos.}$$

¡Ya tenemos la precisión temporal deseada! El esquema completo del experimento se puede ver en la figura 1. El espejo semirreflectante M_1 envía la luz al espejo lejano, pero permite que la luz reflejada lo traspase. El experimentador observa el rayo que retorna y empieza a girar la rueda dentada a velocidades cada vez mayores hasta que la luz desaparece. Ello se debe a que el rayo en su viaje de ida se encuentra un hueco de la rueda y al volver un diente. Fizeau observó que la luz se desvanecía cuando la rueda giraba a 12,1 revoluciones por segundo. Por lo tanto, el tiempo empleado por la luz en su viaje de ida y vuelta era

$$\frac{1}{12{,}1 \text{ rev/s} \times 2 \times 720} \approx 5{,}74 \times 10^4 \text{segundos}$$

(recordemos que hay 720 dientes, pero 2 × 720 dientes más muescas). En su experimento, la distancia entre la rueda y el espejo lejano era de 8,630 kilómetros. Por lo tanto, la velocidad de la luz resulta:

$$c = \frac{2 \times 8{,}630 \text{ km}}{5{,}74 \times 10^4 \text{ s}} \approx 300.738 \text{ km/s.}$$

Combinando las dos fórmulas anteriores, es fácil ver que la velocidad *c* aparece como el producto de tres factores medibles: la velocidad de rotación de la rueda, el número de dientes y muescas y dos veces la distancia entre la rueda y el espejo lejano. Gracias a este producto, podemos llegar al orden de magnitud de la velocidad de la luz, que es de 10^8 metros por segundo, mediante factores relativamente "asequibles": distancias del orden de los 10 kilómetros (10^4 metros), un millar de dientes y huecos, y velocidades angulares en torno a las 10 revoluciones por segundo. Se puede decir que Fizeau apuró cada uno de los factores al máximo de las posibilidades experimentales de su época. La medida final no está exenta de error, pues hay cierta subjetividad en la determinación de la velocidad a la que la luz que retorna es bloqueada por el diente de la rueda. Sin embargo, el experimento de Fizeau fue bastante preciso (el valor aceptado de *c* hoy en día es 299.792,458 m/s).

Lo importante es que Fizeau no pudo embarcarse en la ardua tarea de construir su dispositivo experimental sin antes hacer una estimación del número de dientes, velocidad de la rueda y longitud del recorrido de la luz, necesarios para determinar *c*. Probablemente un argumento puramente estimativo, utilizando el valor previo de *c* debido a Rømer, fue su guía para diseñar el experimento.

Máquinas plantabolos

Máquinas de reposición continua

Mark Fischetti

Una bolera será un lugar ruidoso, pero más allá de sus pistas el estruendo es mucho mayor. Cuando las pesadas bolas se estrellan contra los bolos de madera, todo un dispositivo de ruidosos motores, bandas transportadoras, poleas y levas resuena tras los "fosos", recogiendo los derribos de las colisiones a la vez que alza y planta los bolos para la siguiente.

Al final de cada pista estaban antes los plantabolos, muchachos encargados de recolocar los bolos y devolver las bolas a los jugadores. Hasta 1946 no hicieron su aparición las máquinas, cuando AMF Bowling, Inc., hoy en Richmond (Virginia), presentó la primera "plantabolos automática". Posteriormente, Brunswick Corporation, de Lake Forest (Illinois), entró en liza con su propia máquina plantabolos. Ambas compañías siguen hoy dominando el mercado con artefactos muy reminiscentes de sus orígenes.

Lo que más ha cambiado han sido los accesorios de adorno ideados para impulsar la aceptación del juego. En los años ochenta, entre pista y pista se instalaron cámaras, apuntadas a los bolos, y conectadas a unos ordenadores que calculaban automáticamente las puntuaciones de los jugadores y las mostraban en alto. Más recientemente, un sistema de luces negras, bolos fluorescentes, haces de láser, música fuerte y videopantallas ha convertido el juego de toda la vida en un deslumbrante baile nocturno que se promociona con el nombre de "bolos cósmicos", "discobolos" o "bolos extremos".

Una visita a los bastidores de una típica bolera de 24 pistas descubre un paraíso de los ingenieros mecánicos. Veinticuatro máquinas plantabolos de acero, madera y caucho resuenan sin cesar una junto a otra; cada una mide un metro y medio de alto, pesa 900 kilogramos y recoge, distribuye y planta 10 bolos en unos ocho segundos. Contra la pared trasera se alinean estantes con repuestos de correas, levas, varillas, palancas, lubricantes y trapos, lo que confiere al lugar el aire de un atestado taller de reparación de coches. D.J. Marks, jefe de mecánicos de Cove Bowling Lanes, en Great Barrington (Massachusetts), debe revisar, limpiar y lubricar semanalmente cada máquina. "Es una faena que no para", dice alegremente. "Hago cinco máquinas al día, cuatro los viernes". Se las muestra, orgulloso, a los entusiasmados jugadores. Acabarán imitándome todas las boleras, dice. Así que, en su próxima visita a la bolera, si su puntuación no es la maravilla que usted quisiera, pida que a cambio le permitan echar una mirada a las maravillas mecánicas.

BIBLIOTECA DEL CONGRESO, DIVISION DE FOTOGRAFIA Y GRABADO, COLECCION DEL COMITE DE TRABAJO INFANTIL (*plantabolos*); C SQUARED STUDIOS *Getty Images* (*bolos*); GEORGE RETSECK (*ilustraciones*)

¿SABIA USTED QUE...?



➤ **DIANAS HUMANAS:** Plantabolos humanos colocaban los bolos antes de la aparición de las máquinas. *Arriba*: Bolera del Metro, en Brooklyn, Nueva York, a la una de la noche, abril de 1910.

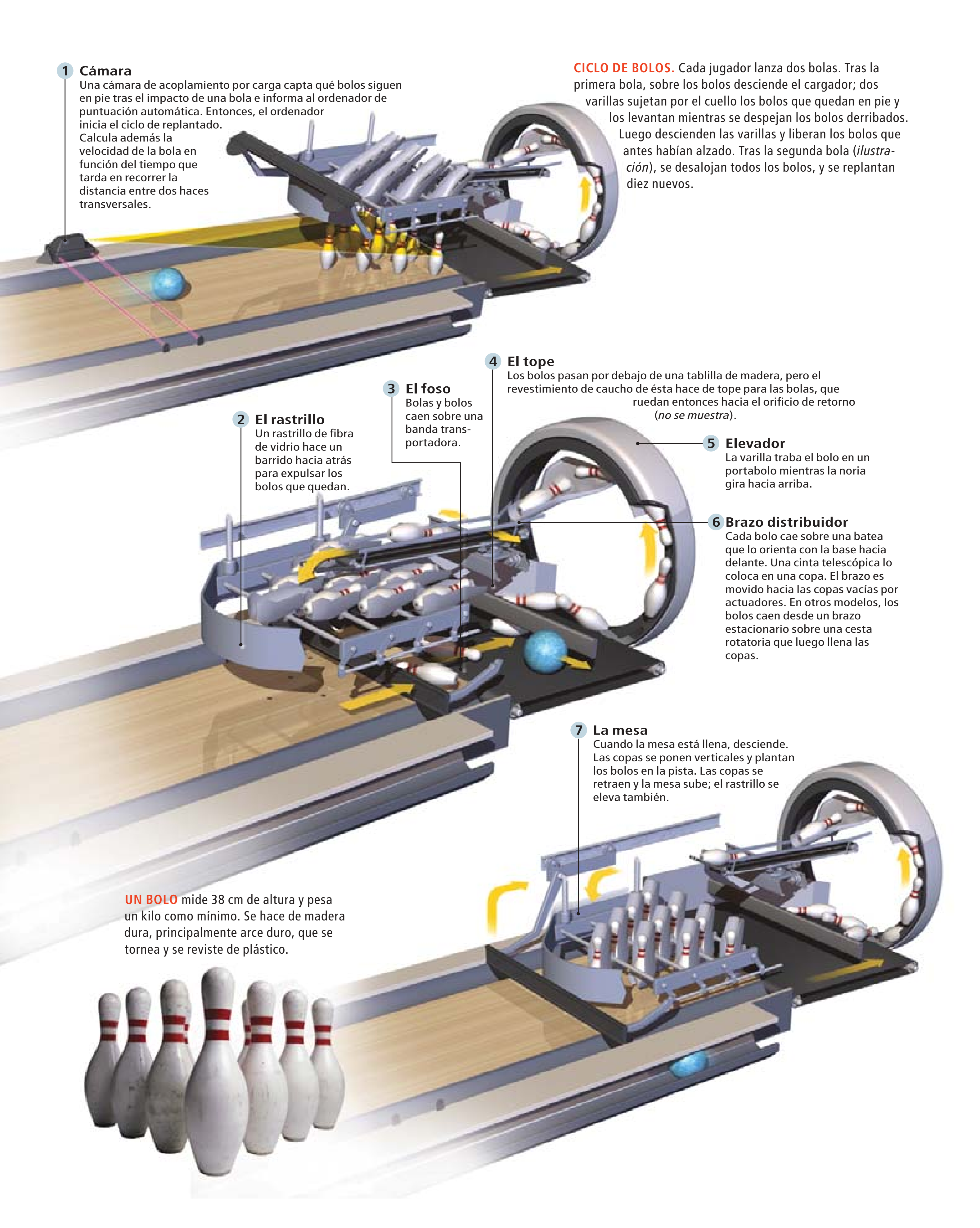
➤ **BOLAS PERDIDAS:** A veces, una bola no retorna al jugador. La culpa suele tenerla un bolo atascado en el orificio de retorno de las bolas, introducido como una cuña bajo la palanca de retorno. Un encargado debe extraer ese bolo, aunque puede que lo libere el golpe de una segunda bola.

➤ **REPLANTADO:** En ocasiones, el rastrillo puede quedar inmóvil sobre la pista. Esto suele ocurrir porque la mesa no ha recibido los diez bolos. El bolo que falta hace que el rastrillo se quede por encima de la mesa y no regrese a su posición neutra, que señala que el ciclo de rastrillado ha de proseguir. El jugador puede solicitar la ayuda de un encargado pulsando el botón de replantado.



LAS BOLAS se hacen casi siempre de resina. Un núcleo más denso en el centro (*se muestra*) disminuye el radio de giro; así, la bola rota mejor lateralmente a la vez que rueda hacia delante, y por ello sigue una trayectoria que se encorva suave y regularmente a lo largo de la pista. Con una densidad de núcleo que crece hacia el exterior, aumenta el radio de giro; de ese modo la bola rueda en línea recta por la pista, pero entonces vira bruscamente cuando crece su momento angular.

EL MECANISMO DE RETORNO se encarga de devolver las bolas al jugador. Cada bola atraviesa el orificio de entrada guiada por una placa oscilante que hay bajo la banda transportadora. Una palanca levanta la bola por una correa que la lleva rodando hasta lo más alto. Del resto se encarga la gravedad.

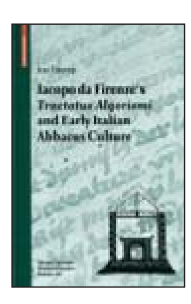


1 Cámara
Una cámara de acoplamiento por carga capta qué bolos siguen en pie tras el impacto de una bola e informa al ordenador de puntuación automática. Entonces, el ordenador inicia el ciclo de replantado. Calcula además la velocidad de la bola en función del tiempo que tarda en recorrer la distancia entre dos haces transversales.
CICLO DE BOLOS. Cada jugador lanza dos bolas. Tras la primera bola, sobre los bolos desciende el cargador; dos varillas sujetan por el cuello los bolos que quedan en pie y los levantan mientras se despejan los bolos derribados. Luego descienden las varillas y liberan los bolos que antes habían alzado. Tras la segunda bola (*ilustración*), se desalojan todos los bolos, y se replantan diez nuevos.
4 El tope
Los bolos pasan por debajo de una tablilla de madera, pero el revestimiento de caucho de ésta hace de tope para las bolas, que ruedan entonces hacia el orificio de retorno (*no se muestra*).
3 El foso
Bolas y bolos caen sobre una banda transportadora.
2 El rastrillo
Un rastrillo de fibra de vidrio hace un barrido hacia atrás para expulsar los bolos que quedan.
5 Elevador
La varilla traba el bolo en un portabolo mientras la noria gira hacia arriba.
6 Brazo distribuidor
Cada bolo cae sobre una batea que lo orienta con la base hacia delante. Una cinta telescópica lo coloca en una copa. El brazo es movido hacia las copas vacías por actuadores. En otros modelos, los bolos caen desde un brazo estacionario sobre una cesta rotatoria que luego llena las copas.
7 La mesa
Cuando la mesa está llena, desciende. Las copas se ponen verticales y plantan los bolos en la pista. Las copas se retraen y la mesa sube; el rastrillo se eleva también.
UN BOLO mide 38 cm de altura y pesa un kilo como mínimo. Se hace de madera dura, principalmente arce duro, que se tornea y se reviste de plástico.



AL-KHWARIZMI. LE COMMENCEMENT DE L'ALGEBRE.

Texto establecido, traducido (al francés) y comentado por R. Rashed. Librairie Scientifique et Technique Albert Blanchard; París, 2007.



JACOPO DA FIRENZE'S *TRACTATUS ALGORISMI* AND EARLY ITALIAN ABBACUS CULTURE,

por Jens Hoyrup. Birkhauser Verlag AG; Basilea, 2007.



MECHANICS AND COSMOLOGY IN THE MEDIEVAL AND EARLY MODERN PERIOD.

Dirigido por Massimo Bucciantini, Michele Camerota y Sophie Roux. Leo S. Olschki; Florencia, 2007.



ASTRONOMY AND ASTROLOGY IN AL-ANDALUS AND THE MAGHRIB,

por Julio Samsó, Ashgate; Aldershot, 2007.

Medievo exacto

El álgebra, una creación musulmana

Los matemáticos islamistas alcanzaron importantes hitos algebraicos entre los siglos nono y quince. Por encima de todos, destacó Muḥammad ibn Mūsā al-Khwārizmī (c. 780-850), llamado el "Euclides del álgebra" porque sistematizó la disciplina y la erigió en un campo autónomo de estudio. Lo realizó con su obra *al-Jabr wa-al-muqābala*. "Al-jabr" (de donde álgebra) denota el cambio de un término negativo de una ecuación al otro lado para hacerlo positivo; "al-muqabala" remite a la cancelación de términos iguales a ambos lados de la ecuación (*Al-Khwārizmī. Le Commencement* de *l'Algèbre*.) Se trata de procedimientos básicos para resolver ecuaciones polinomiales. Al-Khwārizmī (de donde el término algoritmo) los aplicó a la solución de las ecuaciones cuadráticas. Las clasificó en cinco tipos $ax^2 = bx$, $ax^2 = b$, $ax^2 + bx = c$, $ax^2 + c = bx$, $ax^2 = bx + c$. Esta categorización era necesaria desde el momento en que al-Khwārizmī no admitía coeficientes negativos ni cero.

El libro de álgebra de al-Khwārizmī, redactado hacia el 820 en Bagdad, traducido tres veces en latín desde el siglo XII y luego en italiano un poco más tarde, no ha dejado de influir en el pensamiento matemático universal. Funda el álgebra como disciplina matemática independiente; la aplica en aritmética y en geometría e impone una nueva racionalidad analítica. El lector hallará en este volumen su primera traducción rigurosa, así como un estudio y un comentario de texto que le restituyen lo más fielmente posible a su contexto. El *Kitāb al-Jabr wa-al-muqābala* consta de dos partes principales: la teoría algebraica y el cálculo testamentario. Casi la mitad del tratado se halla consagrado a la transformación de las prácticas que empleaban los juristas para calcular los legados, las herencias, etcétera, en una disciplina propia: el cálculo de las obligaciones.

La primera parte es un prólogo breve donde el autor clasifica los diferentes tipos de sabios, antes de reconocer su deuda con el califa al-Ma'mūn. Se trata de una pieza literaria auténtica con una riqueza de léxico del hombre culto. Con la segunda parte, cambia todo: se encuentran los fundamentos del cálculo algebraico, la teoría de las ecuaciones de primer y segundo grados y su aplicación a la solución de numerosos problemas. Ahora la lengua no es la de un literato, aunque correcta. La tercera parte está consagrada a la agrimensura. La cuarta parte del libro aborda los testamentos y la herencia. El léxico reúne términos algebraicos, aritméticos y jurídicos. El lenguaje jurídico nos remite al estado del derecho en el siglo VIII.

Sabemos muy poco de la vida del autor. Lo encontramos en Bagdad integrado en el equipo de traductores de la "Casa de la Sabiduría", junto con el astrónomo Yaḥya ibn Abī Manṣūr y de al-Hajjāj, traductor de Euclides y de Ptolomeo. De sus libros inferimos su vasta formación. Los *zijes* que escribió y sus tratados sobre instrumentos (astrolabios y cuadrante) ponen de manifiesto que había recibido una enseñanza sólida en astronomía india y que estaba familiarizado también con la astronomía griega. Sus libros de aritmética prueban que conocía la aritmética hindú, griega y romana. La actividad de al-Khwārizmī alcanzó su cenit durante el reinado de al-Ma'mūn. Vivía todavía en 847, fecha de la muerte del califa al-Wāthiq.

¿Cuáles podían ser los libros de cálculo en uso en la segunda mitad del siglo VIII? En esa época florecen la lingüística, la historia, la hermenéutica y la teología racional. Se debatían también cuestiones físicas y lógicas, por no hablar de otras disciplinas introducidas con la traducción de instituciones bizantinas. Habría cosas de interés también en astronomía. Se aplica un nuevo método, cuya primera regla dicta determinar un conjunto de elementos discretos y finitos; la segunda, partir de éstos para obtener *a priori* todos los posibles, con la ayuda de una combinatoria. La tercera regla consiste en acotar los casos efectivos. Pero a comienzos del siglo IX asistimos a una corriente de investigación y de traducción en los dominios de lo que por esas fechas se denomina "ciencia de los antiguos" o "ciencias racionales": astronomía, matemáticas, filosofía, medicina, alquimia, etcétera. Los libros de matemática que

circulaban a principios del siglo IX, si consideramos los griegos traducidos al árabe, comprendían los *Elementos* de Euclides, vertidos por al-Hajjāj ibn Maṭar, colega de al-Khwārizmī en la Casa de la Sabiduría. Ni las *Aritméticas* de Diofanto ni la *Introducción a la aritmética* de Nicómaco existían en árabe. En aquella época se conocían también algunos *zijes* de origen diverso (sánscrito, persa y griego).

Para estructurar el álgebra se apoya, entre otros, en la investigación jurídica precedente y contemporánea. Por otro lado, el examen del vocabulario geométrico del *Libro de álgebra* refleja una familiaridad cierta con la terminología de los traductores del griego en árabe. Los términos que designan los polígonos, los ángulos, el círculo, las áreas, etcétera, pertenecen al léxico de la traducción. Lo mismo que los lingüistas y los criptoanalistas, al-Khwārizmī comienza por una clasificación *a priori* de los objetos de su álgebra, con ayuda de procedimientos combinatorios.

Igual que Euclides, al-Khwārizmī comienza por definir los términos primitivos que va a emplear aquí: número, cosa, cuadrado. La "cosa" (*al-shay*) puede muy bien ser un número, un segmento de recta o incluso cualquier otra magnitud. Igual que Euclides, no se limita a resolver problemas, sino que se propone elaborar una teoría, el álgebra. A imagen de Euclides también, al-Khwārizmī exige que los elementos de esa teoría sean apodícticos, es decir, *demostrados*, y no sólo *justificados*. Estas semejanzas sugieren una influencia de Euclides en al-Khwārizmī. Pero mientras aquél sigue un método axiomático, al-Khwārizmī parte de dos tipos de ecuaciones definidas a priori, es decir, de formas fijas y exhaustivas a las cuales se reducen todas las demás. Por otro lado, mientras Euclides demuestra la verdad de las proposiciones, al-Khwārizmī demuestra que el procedimiento o algoritmo que permite determinar la incógnita a partir de lo conocido está sólidamente establecido. Más aún, al-Khwārizmī se halla a la búsqueda de la causa de esta determinación. La demostración constituye así una exigencia de la constructibilidad de la teoría de las ecuaciones. El matemático de Bagdad no sólo conocía los *Elementos* de Euclides, sino que tuvo también acceso a la tradición de Herón, según se infiere de dos breves capítulos del libro de al-Khwārizmī consagrados a la medición de las áreas de figuras simples y a los volúmenes de algunos sólidos elementales.

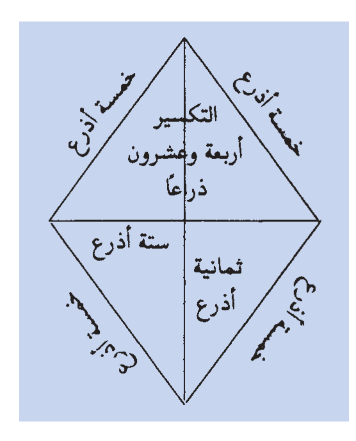
El advenimiento del álgebra como disciplina matemática con al-Khwārizmī es indisociable de tres ideas seminales. La primera idea fundadora es la de la clasificación *a priori* de las ecuaciones. En adelante ya no se partirá de los problemas para descubrir las ecuaciones, sino que es a partir de los términos primitivos y de sus combinaciones que se llega a ellas, es decir, a los seis famosos tipos de los dos primeros grados. El álgebra sólo puede ser una disciplina algorítmica. Ahora bien, si se quiere que esa disciplina sea matemática, es necesario que los algoritmos demuestren su apodicticidad: es necesario asegurar que sean a la vez universales y necesarios. Tal es precisamente la segunda idea fundadora de al-Khwārizmī. El álgebra no es sólo algorítmica, sino también demostrativa. Una vez definidos los términos primitivos de la disciplina, al-Khwārizmī examina la teoría de las ecuaciones de primero y segundo grado; ofrece el caso ideal, cada tipo, y formula el algoritmo que le corresponde. Los sucesores de al-Khwārizmī, matemáticos o filósofos, como al-Fārābī, lo han entendido perfectamente. Una vez asegurado eso, al-Khwārizmī introduce la igualdad y las operaciones elementales de la aritmética. Obtiene los seis tipos canónicos de la ecuación de primer y de segundo grados.

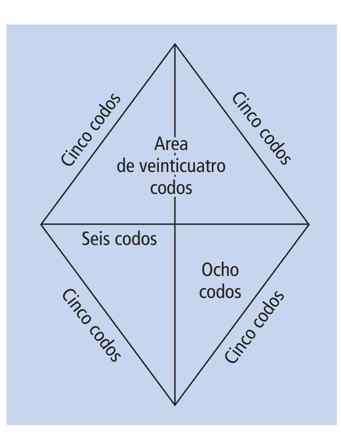
Su *Libro de álgebra* nos ha llegado a través de muchos manuscritos, el más antiguo de los cuales se remonta a un transcrito de 1220. Fue objeto de comentarios, como el de al-Khuzā'ī en 1210. El título del libro ha permanecido: *Kitāb al-Jabr wa-al-muqābala, Libro de álgebra y de al-muqābala*. Los traductores latinos disponían de otros manuscritos árabes más antiguos que los que han sobrevivido en la lengua de origen, puesto que datan, todo lo más, del siglo XI. Se conocen tres traducciones latinas; la de Gerardo de Cremona lleva por titulo *Liber Maumeti filli Moysi Alchoarismi De Algebra et Almuchabala incipit*: Robert de Chester tituló la suya *Liber Algebrae et Amulcabala*..., y, de manera igual, Guillaume de Luna. Los sucesores de al-Khwārizmī se esforzaron por desarrollar las posibilidades que entrañaba. Dos siglos después de su muerte, los breves capítulos del libro se habían transformado en disciplinas autónomas. Y el impacto de la obra original fue desapareciendo de la bibliografía árabe en aras del desarrollo del álgebra que había iniciado. En cambio, traducido tres veces al latín y más tarde a lenguas vernáculas, el libro de al-Khwārizmī se estudió y comentó por los matemáticos occidentales hasta el siglo XVI.

En el *Algebra* de al-Khwārizmī, traducida por Gerardo de Cremona, se inspira la de Leonardo Fibonacci, cuyo *Liber abbaci* inicia una tradición que adquirirá con el tiempo un empuje tal, que en las ciudades república del Renacimiento constituía una práctica común entre la clase mercader enviar sus hijos para un curso de dos años de estudio a una "escuela de ábaco" Desde el *Livero de l'abbecho*, escrito en Umbría entre 1288 y 1290, han sobrevivido varios centenares de manuales, todos ellos en italiano, que contienen a menudo no sólo lo que los maestros necesitaban en su enseñanza, sino también álgebra avanzada. En esa tradición, aunque con personalidad propia, hemos de incluir a Jacopo da Firenze, quien redactó su *Tractatus algorismi* en 1307, en Montpellier. Nos ha llegado en tres manuscritos (vaticano, florentino y milanés). El incipit en latín y la referencia a la *Aritmética* de Boecio denuncian familiaridad del autor con el mundo académico. Tras el incipit, el manuscrito aparece en toscano con alguna ortografía latinizante; hay algunas expresiones provenzales e incluso españolas. El manuscrito aparece hermosamente ilustrado. Los apartados algebraicos prefieren un orden distinto del seguido por al-Khwārizmī, Abū Kāmil y Fibonacci.

En el decurso del tratado, inscrito en la denominada algorítmica latina, encontramos la forma antigua de numeración, romana, y la "moderna", o arábiga. Se pormenoriza el valor de un número de acuerdo con su situación. A tablas, cuadrados y múltiplos, les sigue la división "a regolo", procedimiento en que el resto que pasa al nivel inmediato se retiene en la mente, pero no se escribe. Y, más adelante, la regla de tres, por donde solían comenzar los ábacos, que acostumbraban ofrecerla en términos de proporción, de acuerdo con el modelo de al-Khwārizmī. Los ejemplos de la vida real que aduce Jacopo tienen que ver con el cambio de monedas.

Jacopo pormenoriza el cálculo del interés, de obvia importancia en su entorno comercial. No se olvida de la metrología, auténtico caos a lo largo de los siglos.





Al abordar los problemas de medición, al-Khwārizmī reconoce un "segundo género de cuadrilátero": el de ángulos rectos y lados desiguales, y cuya longitud es superior a su amplitud.

Y dedica dos capítulos a cuestiones genuinamente algebraicas: ecuaciones de primer y segundo grado y problemas de tercero y cuatro grado que, o bien son homogéneos, o pueden reducirse al segundo o primer grado. Las reglas de Jacopo comienzan por una normalización. El álgebra de Jacopo no depende de la de Fibonacci ni de las traducciones latinas de al-Khwārizmī. Lo que no niega que sí proceda de una *al-jabr*. Nos sitúa, pues, ante un canal hasta ahora desconocido del mundo árabe y su matemática.

Aparte de esa vertiente práctica de la matemática medieval, ¿tuvo alguna relación con otras ciencias? *Mechanics and Cosmology in the Medieval and Early Modern Period* se propone identificar una zona de convergencia con la física. Comprende tres partes, que corresponden a tres períodos históricos y conceptuales. La primera parte identifica los factores de permanencia y los factores de transformación desde la Edad Media en adelante; la parte segunda se centra en la recepción precoz del copernicanismo en diferentes contextos intelectuales. Los ensayos de la tercera parte están dedicados a diferentes interacciones entre cosmología y la nueva ciencia del movimiento que desde ese momento recibiría el nombre de mecánica.

Desde el punto de vista histórico, la filosofía natural —entendida como búsqueda de las causas— y las ciencias matemáticas —entendidas como no causales— han interactuado mucho más de lo que han venido admitiendo los historiadores de la Revolución Científica. Cuando Aristóteles denominaba a la astronomía una de las ciencias matemáticas más afines a la filosofía, sugería esos nexos. La tríada formada por la filosofía natural, la matemática y la metafísica aparece en la *Metafísica* VI de Aristóteles, en la apertura del *Almagesto* de Ptolomeo y en múltiples lugares más. Buena parte de la obra de Ptolomeo, de la *Geografía* a la *Optica*, amalgama lo matemático y lo físico. El propio arquetipo para la separación de ambas, el *Almagesto*, abre con los argumentos cosmológicos en pro de la centralidad e inmovilidad de la Tierra, para examinar más tarde el orden de las esferas planetarias. Sus *Hipótesis planetarias* rechazan también la oposición polar entre matemática y física, al convocarlas en la construcción de instrumentos y mecanismos.

Pero en la historia de la ciencia hizo fortuna la idea de una dicotomía aristotélica entre filosofía natural y ciencia matemática. Apoyándose en ello se creó el mito de que el *De revolutionibus* de Copérnico, la *Astronomia nova* de Kepler y el *Dialogo* de Galileo constituyen innovaciones que rechazaron o superaron tal distinción, cambiando con ello el mundo.

Lo cierto es que el espacio entre la filosofía natural y las ciencias matemáticas no estaba vacío ni en el mundo árabe ni en el latino, como prueban las tradiciones de óptica, astronomía, la ciencia de los graves y la ciencia del movimiento. Entre los siglos trece y quince, lo mismo en la teoría que en la práctica, la astronomía se nutre de "pensamiento mecánico", acomodado entre la filosofía natural (entendida como una búsqueda de las causas) y la astronomía (entendida como una ciencia matemática no causal).

Para ilustrar los signos de ese pensamiento mecánico podemos arrancar de los *Principios de astronomía* de al-Biṭrūjī, una obra árabe de la España del siglo XII que fue traducida al latín en 1217. La obra impulsó en la Europa latina una tradición que conjugaba las preocupaciones físicas con la astronomía matemática. Su foco sobre los principios de los movimientos celestes le impulsaba hacia un cuadro esquemático de las esferas homocéntricas que es mecánico en su énfasis en el movimiento celeste unidireccional y su velocidad decreciente desde las estrellas fijas hasta la Tierra inmóvil.

Avanzado el siglo XIII, hallamos una muestra del interés de los astrónomos por los mecanismos en el informe de Robertus Anglicus sobre la búsqueda de un escape (en los relojes). Mientras pergeñaba un nuevo ecuatorio en 1309, Guido de Marchia trenzaba, en su *Tractatus super planitorbium* (1310), en especulaciones cosmológicas insólitas sobre anillos planetarios inmersos en un firmamento fluido, tras el énfasis de al-Biṭrūjī. Pasado el ecuador del siglo XIV, Giovanni Dondi construyó un *astrarium* funcional, la máquina más compleja de su tiempo, que Dondi utilizó para vindicar la posibilidad de epiciclos y excéntricas contra el rechazo de los filósofos que los consideraban imposibles. Esos temas intersecan en la obra de Johannes Regiomontanus. Aunque admirador y expositor de Ptolomeo, criticó epiciclos y excéntricas del *Almagesto*. Su propuesta de modelos homocéntricos para el Sol y la Luna en 1460 implicaba una modificación de al-Biṭrūjī.

Sin condicionarla, como pretendieron años atrás ciertas escuelas de cuño marxista, resulta manifiesto que la ciencia no es ajena al entorno social. A ello le dedica un valioso artículo introductorio Samsó en su nueva compilación de artículos *Astronomy and Astrology in al-Andalus and the Maghrib,* publicados a lo largo del decenio de 1994 a 2004. (Nuestros lectores conocen ya el pensamiento del autor sobre la tradición del almanaque perpetuo, aquí abordado in extenso, junto con la tradición magribí y su relación con la tradición astronómica andalusí.)

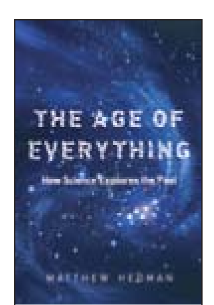
La fuente principal para la historia social de las ciencias exactas en al-Andalus es el *Ṭabaqāt al-umam* (1068). Junto a los diccionarios bio-bibliográficos, la descripción de las escuelas, con el obligado viaje a Oriente. De las escuelas, la de Maslama (finales del siglo X y principios del XI) extendió su sombra, parece, sobre las de Toledo (Ṣāid, Ibn al-Zarqālluh) y Zaragoza (al-Mu'taman), durante el período taifa.

En el quehacer diario, algunas profesiones necesitan cierta familiaridad con la matemática: los *faraid* y calculadores, topógrafos, maestros, artesanos, constructores de aparatos astronómicos y astrólogos. (Los maestros de Maslama

eran todos *faraids*. *Ilm al-Farā'id* es la puerta a través de la cual la aritmética se convertía en una ciencia aceptada en círculos religiosos y ambas disciplinas se enseñaban en la Gran mezquita de Valencia por Abū Bakr ibn Juzayy.) Los tratados de agricultura de los siglos XI y XII describen el uso de cierto aparato, semejante al astrolabio, para medir la pendiente del terreno en la construcción de acequias. Famoso es el desacuerdo entre astrónomos y arquitectos a propósito de la ampliación de la Gran mezquita de Córdoba bajo al-Ḥakam II. Los astrónomos quisieron aprovechar la coyuntura para reorientar la fábrica.

De los 55 matemáticos documentados antes de 976, en 28 referencias se alude a su tarea docente, incluidos la enseñanza de la corte y del *amir* Muḥammad I (852-886). Los niños aprenderían las cuatro reglas, geometría y aritmética. La astronomía debía enseñarse a partir del *Almagesto*, una vez conocida la geometría euclidiana. Ese saber riguroso convivía, exceptuados ciertos vaivenes de longitud variable, con un uso extendido de la astrología popular, aunque cultivada también en palacio. Si la astrología fue intensamente perseguida por Abd al-Malik ibn Ḥabīb (m.853), reaparece tras la caída del Califato; se produce otra crisis con la llegada de los almorávides a al-Andalus, para volver a registrarse un renacimiento durante el período nazarí.

—*Luis Alonso*



THE AGE OF EVERYTHING. HOW SCIENCE EXPLORES THE PAST,
por Matthew Hedman.
The University of Chicago Press; Chicago, 2007.

Relojes para todos los tiempos

A partir del registro fósil, la cosmología y la arqueología, el hombre se ha propuesto determinar la edad de las cosas

El descubrimiento de los rayos X en 1895 había intrigado mucho al físico francés Henry Becquerel (1852-1908). Si la emisión de esas radiaciones se hallaba asociada a cierta luminiscencia del vidrio del tubo de Croques con que se obtenían, ¿no ocurriría lo mismo con otras sales al exponerlas a los rayos del sol? En ese caso, tales sales podrían ser también emisoras de rayos X. ¿No podrían las sales de uranio tener la propiedad de impresionar una placa fotográfica envuelta en un papel opaco? Así ocurrió. Y el experimento hubiera inducido al físico a un gran error de no haber concurrido cierta circunstancia.

Un día en que el mal tiempo no le permitió exponer las sales de uranio al sol, las dejó en un cajón de su mesa sobre una placa fotográfica protegida por su envoltorio. Pasados unos días, tuvo la curiosidad de revelar la placa fotográfica y observó asombrado que estaba tan velada como las que había expuesto al sol en experiencias anteriores. Becquerel comprendió inmediatamente que la luz del sol nada tenía que ver con aquel fenómeno y que el uranio emitía de forma natural una misteriosa radiación. Así tuvo lugar el descubrimiento de los “rayos Becquerel” y, de hecho, el de la *radiactividad*, nombre que le dio a este fenómeno Marie Curie (1887-1934).

Como otros muchos físicos de esa época, Marie Curie se interesó por este descubrimiento; abría un nuevo campo de investigación que parecía prometedor. Con su marido, Pierre Curie (1859-1906), comenzó por estudiar todos los elementos conocidos y halló que también el torio era radiactivo. Emprendieron de nuevo en 1898 el estudio del uranio y de la pechblenda (de la que se extraía). Los esposos Curie detectaron la presencia de dos elementos nuevos a los que denominaron *polonio* y *radio*. Sólo quedaba por esclarecer la naturaleza de la radiactividad.

En 1900, Ernest Rutherford (1871-1937) y Frederick Soddy (1877-1956) proponen una teoría de la radiactividad que expondrán detenidamente en 1902: ciertos átomos se desintegran espontáneamente y, después de emitir partículas alfa o beta, se convierten en átomos de otros cuerpos diferentes. Hacia 1908, se tenía ya una visión de conjunto de la naturaleza de la radiactividad, completada en 1913 por la *ley de filiación radiactiva*, debida a Soddy y al americano de origen polaco Kasimir Fajans (1887-1975). Según ésta, existen tres familias de radioelementos naturales: la del uranio, la del torio y la del protactinio. Dichos elementos se desintegran espontáneamente y se convierten, por emisión alfa o beta, en otros elementos radiactivos.

Por otra parte, ya en 1899, los físicos alemanes Julius Elster (1854-1920) y Hans F. Geitel (1855-1922) definieron la *ley del decrecimiento radiactivo*, según la cual el número de partículas emitidas por segundo disminuye en función del tiempo. Así surgió la noción de *período* de un elemento radiactivo (tiempo necesario para que la radiactividad de un cuerpo disminuya a la mitad) y se confirmó que este período de *semidesintegración* difiere de un radioelemento a otro (desde una fracción de segundo a millones de años). El desarrollo de esas investigaciones condujo a su aplicación al campo de la medida de los tiempos geológicos, dando lugar a lo que se ha llamado la *Geocronología*. Precisamente en esas coordenadas se sitúa el libro que comentamos aquí.

Matthew Hedman, investigador asociado en el departamento de astronomía de Cornell, presenta de forma amena para un público no especialista la historia de los intentos de la humanidad para medir los tiempos pasados. Desde los calendarios mayas hasta las depuradas técnicas para medir la edad del universo y las galaxias, la aventura humana del conocimiento científico ha ido afinando en la utilización de las técnicas geocronológicas que se iniciaron con el carbono radiactivo y han culminado en la apasionante aventura de la medición de los límites espacio-temporales de esa realidad compleja a la que hemos convenido en llamar el universo. Un ensayo que todos desearíamos llegase pronto en castellano a los lectores de España y Latinoamérica.

—*Leandro Sequeiros*

Asistencia sanitaria básica para todos

Mediante diez resoluciones con apenas coste podría asegurarse un derecho fundamental para todos

Jeffrey D. Sachs

Cuando se fundó la Organización Mundial de la Salud hace sesenta años, los gobiernos declararon la sanidad un derecho humano fundamental, "sin distinción de raza, religión, ideas políticas o condición socioeconómica". Hace treinta años, en Alma Ata, los gobiernos proclamaron sanidad para todos en el año 2000, principalmente mediante la generalización del acceso a los servicios e instalaciones de asistencia primaria. El mundo no cumplió ni por asomo ese objetivo, pero todavía podríamos alcanzarlo a un coste increíblemente bajo. Es posible conseguir asistencia sanitaria para todos en los próximos años con diez medidas clave.

Primero, los países prósperos deberían dedicar el 0,1 por ciento de su Producto Interior Bruto a la asistencia sanitaria de los países de rentas nacionales bajas. Con los 35 billones de dólares de PIB del mundo rico se podría crear un fondo de alrededor de 35 millardos anuales; suficientes para los 35 dólares *per capita* con que cubrir los servicios sanitarios adicionales de los aproximadamente mil millones de personas que los necesitan.

Segundo, la mitad del incremento debería canalizarse a través del Fondo Global para la Lucha contra el Sida, la Tuberculosis y la Malaria. El Fondo Global ha demostrado ser una institución altamente eficaz, con mínima burocracia y máximo impacto. Ha financiado la distribución de unos 30 millones de mosquiteras antimalaria, ha ayudado a conseguir tratamiento con antirretrovirales para más de un millón de africanos y a curar de tuberculosis a más de dos millones de personas.

Tercero, los países de bajos ingresos deberían dedicar el 15 por ciento de su propio presupuesto nacional a la sanidad. Consideremos un país pobre allí donde la media de ingresos es de 300 dólares anuales. El presupuesto nacional total podría ser de alrededor del 15 por ciento del PIB, aproximadamente 45 dólares *per capita*. La inversión en sanidad del quince por ciento de esta cifra supondría sólo 6,75 dólares por persona al año, insuficiente para proporcionar asistencia sanitaria básica adecuada. Ahora bien, si le sumamos los 35 dólares *per capita* de fondos de donantes, cumpliría su tarea.

Estas sencillas medidas podrían salvar las vidas de cerca de 10 millones de personas al año, entre niños y adultos.

Cuarto, el mundo debería adoptar un plan para controlar la malaria de forma integral, con la mirada puesta en rebajar la mortalidad por paludismo a casi cero en 2012, por medio del acceso generalizado a mosquiteras antimalaria, fumigando el interior de las viviendas cuando corresponda y con medicamentos eficaces al desatarse la enfermedad.

Quinto, los países ricos deberían seguir adelante con sus compromisos adquiridos antaño de asegurar el acceso a antirretrovirales a todos los infectados de HIV en 2010.

Sexto, el mundo debería llenar el vacío financiero de aproximadamente tres mil millones de dólares al año para el control integral de la tuberculosis, otra área en la que las intervenciones conocidas y experimentadas desde hace tiempo son muy efectivas, aunque adolecen de una insuficiencia crónica en cuanto a financiación.

Séptimo, el mundo debería satisfacer, por sólo unos pocos miles de millones de dólares al año, el acceso de los más pobres de los pobres a los servicios sanitarios relacionados con la reproducción, entre ellos la planificación familiar, la anticoncepción y el cuidado obstétrico de emergencia.

Octavo, el Fondo Global debería ofrecer aproximadamente 400 millones de dólares anuales para el control integral de varias enfermedades tropicales (principalmente las infecciones por gusanos), que se dan en casi las mismas regiones donde prolifera la malaria.

Noveno, el Fondo Global debería abrir un nuevo mecanismo de financiación para reforzar los cuidados básicos de salud, incluyendo —que es lo más importante— la construcción de clínicas y la contratación y capacitación de enfermeras y personal sanitario local.

Décimo, utilizando los grandes avances recientes en medicina y salud pública, deberían equiparse los sistemas de salud ampliados de los países pobres para que puedan controlar enfermedades no transmisibles desatendidas durante mucho tiempo y que, no obstante, admiten un tratamiento con poco presupuesto: hipertensión, cataratas y depresión.

Estas sencillas medidas podrían salvar las vidas de cerca de 10 millones de personas al año entre niños y adultos, a un coste que pasaría casi inadvertido para las naciones más ricas del mundo. Estas medidas no acelerarían, sino que frenarían el crecimiento de la población en las regiones pobres, relajando las tensiones económicas y ambientales que supone el aumento demográfico. La sanidad para todos no es sólo el imperativo moral que era cuando se fundó la Organización Mundial de la Salud hace 60 años, es también la ganga más provechosa del planeta.

Jeffrey D. Sachs es director del Instituto de la Tierra de la Universidad de Columbia.

BRUCE GILBERT/INSTITUTO DE LA TIERRA



ESPECIAL: EL FUTURO DE LA FISICA

LHC, el gran colisionador de hadrones,
por Graham P. Collins

Revolución en la física de partículas,
por Chris Quigg

Colisionadores del mañana,
por Barry Barish, Nicholas Walker y Hitoshi Yamamoto

Microquimerismo,
por J. Lee Nelson

Muchas personas, si no todas, albergan cierto número de células procedentes de individuos genéticamente distintos: de su madre y, en el caso de mujeres que han estado embarazadas, de sus hijos. ¿Qué función cumplen?





Dinámica de las capas de hielo,
por Robin E. Bell

Bajo los hielos de la Antártida y Groenlandia han aparecido abundantes flujos de agua líquida, que intensifican los efectos del cambio climático.

Matteo Ricci y la ciencia china,
por Dagmar Schäfer

Los jesuitas se apoyaron en la ciencia occidental para introducirse entre las élites chinas. Una estrategia cultural que terminó en fracaso.

El castor austral,
por Marta Lizarralde, Julio Escobar y Guillermo Deferrari

El castor norteamericano fue introducido en la isla Grande de Tierra del Fuego hace más de 60 años, para su aprovechamiento como recurso peletero. Desde entonces, ha causado grandes alteraciones en el bosque.

